hpt

(11) Na Natrium 22.989770 2 8 1

(74) W Wolfram 183.84 2 8 18 32 12 2

(53) I Iod 126.90447 2 8 18 18 7

NaWI 4

FERTL
JUNGWIRTH
MATZNER

NATURWISSENSCHAFTEN FÜR HTL

NEU+

BILDUNGSSTANDARDS

KOMPETENZORIENTIERT

FERTL
MATZNER
JUNGWIRTH

(11) Na Natrium 22.989770 2 8 1

(74) W Wolfram 183.84 2 8 18 32 12 2

(53) I Iod 126.90447 2 8 18 18 7

NATURWISSENSCHAFTEN für HTL 4

Chemische Technologie | Biotechnologie | Gravitation | Thermodynamik | Moderne Physik | Aktuelle gesellschaftliche Themen | Ökologie und Gesellschaft

Verlag Hölder-Pichler-Tempsky GmbH, Wien
www.hpt.at

Vorwort

Liebe Schülerin! Lieber Schüler!

Dieses Buch soll eine Lern- und Unterrichtshilfe für den Naturwissenschaftsunterricht vor allem an technischen Schulen sein. Wir haben versucht, das Buch so zu konzipieren, dass es auch fachübergreifend genutzt werden kann. Für eine Wissenserweiterung im Fachenglisch kann das Buch aufgrund zahlreicher englischer Ausdrücke und Beispiele ebenfalls wertvolle Hilfe leisten.

Merk & Würdig

Unter **Merk&Würdig** findest du das Wichtigste des jeweiligen Abschnitts auf einen Blick. Zusammen mit den orange unterlegten Merksätzen und Formeln soll dir diese Zusammenstellung das Lernen erleichtern.

Übungen

Übungen helfen dir zu überprüfen, ob du die verschiedenen Kompetenzen (Analysieren, Abschätzen, Darstellen, Berechnen etc.) bereits erworben hast. Hier findest du Testfragen zum Ankreuzen, Lückentexte und weitere Übungen. Sie machen, wie sich zeigt, beim Lösen durchaus Spaß. Natürlich ist bei einer technischen Ausbildung das Ermitteln von Ergebnissen mit Hilfe der Mathematik notwendig. Unter den zahlreichen anwendungsorientierten Rechenübungen entdeckst du sicher auch Aufgaben zu einer Thematik, die dich interessiert.
TIPP: Am Ende des Buches findest du einen Lösungsteil.

Thema & Gesellschaft

Unter **Thema&Gesellschaft** findest du Themen, die dich zum Nachdenken über gesellschaftliche und wirtschaftliche Erkenntnisse anregen sollen, sodass du dir leichter eine politische Meinung bilden kannst. Sie „dürfen" auch in anderen Gegenständen, z. B. Religion, diskutiert werden …

Ergänzung & Ausblick

Ergänzung und Ausblick: Unter diesem Logo werden Vertiefungen und Erweiterungen gebracht, die nicht als Lernstoff für den Regelunterricht gedacht sind. Da findet sich Interessantes für Neugierige oder auch Brauchbares zur Vorbereitung von Referaten.

Experiment

Experimente stehen im Zentrum der naturwissenschaftlichen Methode. Unter dem Logo mit dem Papierflieger findest du

- historische Experimente,
- Experimente, die deine Nawi-Lehrerin oder dein Nawi-Lehrer vorzeigen kann,
- Experimente, die du selber durchführen kannst.

Beispiel

Das Buch enthält unter dieser Rubrik zahlreiche ausführlich ausgeführte **Musterbeispiele**. Hier bekommst du Hilfe und gute Tipps!

In diesem Buch findest du kaum Hinweise auf Internetseiten. Da sich Webadressen häufig ändern, kommst du mit Suchmaschinen oft schneller zum Ziel. Verwende für deine Suche Stichworte (auch in englischer Sprache) aus dem Buch.

Viel Erfolg wünscht das Autor/innenteam!

TIPP: Bewahre das Buch für spätere Jahre zum Nachschlagen auf!

Das Autor/innenteam dankt Ursula Matzner (Illustrationen)

Inhalt

1

Naturwissenschaftliches Arbeiten

In diesem Kapitel geht es um

- Erkenntnisgewinn
- die Krise der klassischen Mechanik
- Geschwindigkeit als Differenzialquotient
- Arbeit als Integral

1.1 Erkenntnisgewinn in der Naturwissenschaft

(serendipity in the field of science)

Columbus entdeckt Amerika, Becquerel entdeckt die Radioaktivität und Röntgen eine unbekannte Strahlung – nicht selten übernimmt der pure Zufall die Regie bei der Gewinnung neuer Erkenntnisse.

Ein Beispiel ist die Entdeckung der rätselhaften „X-Strahlung":

In den 1890er-Jahren experimentierte der deutsche Physiker W. Conrad **Röntgen** mit Gasentladungsröhren. Legt man an diese Hochspannung an, so beginnen die Gase zu leuchten.

Am 8. Oktober des Jahres 1895 startete Röntgen ein denkwürdiges Experiment: Er deckte die Gasröhre ab, um die Kathodenstrahlen besser beobachten zu können. Zwei Tische weiter leuchtete plötzlich ein fluoreszierender Kristall auf, der zufällig dort lag. Skeptisch wiederholte Röntgen das Experiment und bald war ihm klar, dass er etwas erzeugt hatte, das die Abdeckung durchdringen konnte. Die rätselhaften Strahlen nannte er „X-Strahlen". Heute spricht man von **Röntgenstrahlen**, im englischen Sprachraum hat sich der Name *X-rays* erhalten.

Nachdem (auf welche Weise auch immer) ein naturwissenschaftlicher Sachverhalt entdeckt wurde, beginnt erst so richtig die Arbeit: Es muss eine **Theorie** aufgestellt werden, die mittels **Hypothesen** weitere Vorhersagen ermöglicht. Wissenschaftliches Agieren bedeutet, dass Theorien auch etwas erklären müssen!

Abb. 6.1 *Röntgenbild der Hand von Röntgens Frau*

„Achtung!
Jetzt gibt es nur zwei Möglichkeiten: Entweder es funktioniert oder es funktioniert nicht."
Zitat aus „Jim Knopf und Lukas, der Lokomotivführer" von MICHAEL ENDE

Merk & Würdig

Die wissenschaftliche Methode:

Wissenschaftliches Arbeiten besteht aus einer Abfolge von Schritten, die in etwa so verläuft:

- Fragestellung, die sich beispielsweise aus Widersprüchen in alten Theorien oder aus überraschenden Messungen ergibt.
- Formulierung einer Hypothese
- Test dieser Hypothese **(Experiment)**
- Auswertung experimenteller Daten
- Ziehen von Schlussfolgerungen
- Neuformulierung der Hypothese
- … und so weiter …

1.1.1 Die Theorie auf dem Prüfstand

- Theorien müssen Vorhersagen ermöglichen, die prinzipiell an der Überprüfung scheitern können. Wissenschaftliche Aussagen müssen durch Experiment oder Beobachtung **falsifizierbar (= widerlegbar)** sein.
- Wissenschaftliche Theorien müssen eine kritische Überprüfung ermöglichen, sie sind aber nicht **verifizierbar (= beweisbar)**. Im Gegensatz dazu sind Sätze der Mathematik aus vorgegebenen Axiomen beweisbar.

Auf diese Weise gelingt es ganz gut, die Wissenschaft von anderen Denktraditionen – wie etwa Ideologien und Religionen oder Parawissenschaften – abzugrenzen.

Ergänzung & Ausblick

Abb. 6.2 ***Der Induktionsschluss:*** *Aus „Einige Raben sind schwarz" folgt „Alle Raben sind schwarz".*

Schluss mit dem Induktionsschluss
Karl Popper[1)] entwickelte eine wissenschaftstheoretische Methodenlehre, die das **Induktionsprinzip** als Grundlage der Naturwissenschaften **ablehnt**.

Popper nutzt das **„Trial-and-error-Verfahren"**: Die Wissenschaft macht theoretische Vorschläge, die jedoch nur **vorläufig** sind und auch verworfen werden dürfen.

Abb. 6.3 *POPPER*

[1)] Sir (1964) KARL RAIMUND POPPER (1902 Wien – 1994 London), Philosoph österreichischer Herkunft. Er war Professor in London und gilt als Begründer und Hauptvertreter des **kritischen Rationalismus**.

1.1.2 Wie kommt es zur Anerkennung einer Theorie?

- Die **Brauchbarkeit**: Die Praxis zeigt, dass die „Brauchbarkeit" einer Theorie meist ein Maß für ihre Anerkennung ist. Die Newton´sche Physik ist zwar falsch (wie in diesem Buch noch gezeigt wird), aber sie ist in Verwendung, weil sie für die meisten Probleme des Alltags brauchbare Lösungen anbietet. Da „Brauchbarkeit" aber ein sehr weiter Begriff ist, spielen für die Anerkennung einer Theorie auch andere Werte eine Rolle.
- Vor allem **Einfachheit**: Hier kommt das so genannte Ökonomieprinzip („**Ockhams Rasiermesser**") zu tragen: Alle zur Erklärung einer Sache nicht notwendigen Begründungen sind überflüssig und daher „wegzuschneiden".
- **Universalität**: Eine Theorie soll möglichst viele Phänomene gemeinsam beschreiben. Der Elektromagnetismus erfüllt beispielsweise diesen Grundsatz und beschreibt Funkwellen, Wärme-, Licht- und Röntgenstrahlen mit demselben Formalismus. Das Problem dabei: Naturwissenschaftliches Streben nach Universalität führt oft zu schwierigen, praxisfernen und daher unbrauchbaren Konzepten.
- **Gesellschaftspolitische Prozesse** sind für die Anerkennung von Theorien oder deren Befürworter oft wesentlich! Beispielsweise:
  - Folgt der Wissenschafter/die Wissenschafterin dem Mainstream oder ist er bzw. sie wissenschaftlich im Abseits? (Der Geist der Mehrheit hat nicht immer recht!)
  - Hat der Autor/die Autorin eine hohe Anzahl wissenschaftlicher Publikationen in renommierten Zeitschriften veröffentlicht?

WILLIAM VON OCKHAM[1]:
„Es ist eitel, etwas mit mehr zu erreichen, was mit weniger zu erreichen möglich ist."
Man nennt dieses Prinzip „Ockhams Rasiermesser", weil es dazu dient, „Platons Bart" (= überflüssige Begründungen) wegzuschneiden.

Merk & Würdig !

- Wissenschaftliche Theorien müssen **falsifizierbar** (widerlegbar) sein.
- Wissenschaftliche Hypothesen lassen sich nicht beweisen. Es gibt keine absolute „Wahrheit".
- Wissenschaftliche Aussagen sind prinzipiell mit Unsicherheiten behaftet.
- Auch „falsche" Theorien können durchaus brauchbar sein.

1.2 Erfolg und Krise der klassischen Physik

(success and crisis in the history of physics)

„Wissen hält nicht länger als Fisch."
ALFRED NORTH WHITEHEAD (1861 – 1947), Logiker und Philosoph.

1.2.1 Die klassische Physik

Die **„klassische Physik"** des 19. Jh. war davon geprägt, alle Aspekte des Naturgeschehens mit **mechanischen Modellen** zu erklären.

Der tatsächliche Siegeszug wurde vor allem in den technischen **Anwendungen** sichtbar. Wissenschaft und Technik begannen zusammenzuwirken – dies veränderte den Alltag und bildete die Grundpfeiler unserer gegenwärtigen Gesellschaft:

- **Mechanisierung der Arbeit:** „Industrielle Revolution", Ende des 18. Jh. durch die Erfindung der Dampfmaschine.
- **Entwicklung des Verkehrs:** Eisenbahn als Massenverkehrsmittel, Auto als Individualverkehrsmittel (19. und 20. Jahrhundert).
- **Verfügbarkeit von Energie:** „Elektrifizierung" mit Hilfe von Dampfturbine und Generator.

Kelvin schrieb 1884:
„Ich bin niemals zufrieden, bevor ich ein mechanisches Modell des Gegenstandes konstruiert habe …"
Mit dieser Ansicht ist Kelvin ein typischer Vertreter der klassischen Physik.

Abb. 7.1 *KELVIN (W. THOMSON)*

Gegen Ende des 19. Jh. wurden Phänomene bekannt, die nicht mehr mit den klassischen Modellvorstellungen erklärbar waren. Folgende Fragen verwiesen auf **„Lücken" der klassischen Physik**:

- Bewegt sich die Erde durch den Äther? (Das Experiment von Michelson im Jahr 1881 ergab ein Null-Ergebnis für die Geschwindigkeit der Erde gegen diesen hypothetischen Äther!)
- Wie kann man die Emissions- und Absorptionsspektren (z. B. das Linienspektrum des Wasserstoffs) erklären?
- Wie kann man das Strahlungsspektrum eines schwarzen Körpers erklären? (Die Theorie sagte eine „UV-Katastrophe" voraus! Die experimentell beobachtete Strahlung „hält sich" – Gott sei Dank – nicht an die Theorie …)

[1] WILLIAM VON OCKHAM (1288 Surrey, England – 1347 München), mittelalterlicher Philosoph, Theologe und Schriftsteller.

1.2.2 Die moderne Physik

Die Antworten auf diese Fragen waren nur im Rahmen neuer, „moderner“ Theorien möglich; sie führten zu den **Relativitätstheorien** und zur **Quantenmechanik**.

Diese Theorien sind auch deshalb modern, weil sie mit der Tradition gewisser Vorstellungen brechen[1]. So benötigt die Relativitätstheorie eine neue Raum- und Zeitvorstellung, und die Quantentheorie lässt sich in wesentlichen Belangen überhaupt nicht mehr in ein Korsett anschaulicher Modelle zwingen; sie ist nicht mehr **vorstellbar** – aber sie ist **mathematisch darstellbar**.

Der „Höhenrausch“ der „Klassischen Physik“ kann durch eine kleine Anekdote veranschaulicht werden:
Als sich Max Planck um 1874 im Alter von etwa 16 Jahren bei Philipp von Jolly nach den Aussichten eines Physikstudiums erkundigte, riet dieser dringend ab:

„In der Physik sei im Wesentlichen schon alles erforscht, und es gäbe nur noch einige Lücken auszufüllen.“

Max Planck entschloss sich trotz dieser Warnung für ein Physikstudium. Einige Jahre später hat Max Planck die „Energiequanten“ eingeführt und damit die „Geburt der **Quantenmechanik**“ eingeleitet, die in wesentlichen Punkten dem klassischen mechanischen Modell widerspricht und eine völlig neue Entwicklung ermöglichte.

„Warum-Fragen" in der Naturwissenschaft

Traditionell war oft die Frage nach einer Ursache eines bestimmten Phänomens der Anstoß zur wissenschaftlichen Arbeit. So wurde beispielsweise die Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung gesehen.

Fragen nach der Ursache sind weiterhin wichtig, aber in Teilbereichen der Naturwissenschaft nicht sinnvoll. Warum-Fragen gehen davon aus, dass etwas eine Ursache haben **muss**. Gibt es aber keine Ursache, ist die Warum-Frage sinnlos. In der Quantenphysik kommen solche Phänomene ohne Ursache vor – man spricht dort vom „reinen Zufall". Aus moderner naturwissenschaftlicher Sicht können also Warum-Fragen durchaus unbeantwortet bleiben, was naturgemäß recht unbefriedigend ist …

Merk & Würdig

Naturwissenschafter/innen bemühen sich, das **Wie** eines Sachverhalts zu erklären und weniger das **Warum**.

Abb. 8.1

- Nimm Stellung! Welche Aussagen sprechen dich an?
- Widersprich konstruktiv, begründe deine Kritik.
- Welche Argumente kannst du zusätzlich einbringen?

[1] **„Moderne Physik“** beschäftigt sich großteils mit Erkenntnissen, die nicht so neu sind wie der Titel vermuten lässt. Manches der „modernen Physik“ wurde vor mehr als hundert Jahren veröffentlicht. So hat Einstein die spezielle Relativitätstheorie 1905 niedergeschrieben. „Modern“ ist hier im Gegensatz zum Begriff „klassisch“ zu verstehen. Man spricht auch von „Moderner Kunst“. Dieser Ausdruck wird in der Musik und der bildnerischen Kunst für Stilrichtungen verwendet, die sich von der „klassischen Kunst“, hier vor allem der „Romantik“, unterscheiden wollen.

1.3 Mathematik – die Sprache der Physik

(mathematics, the language of science)

„Die Mathematik ist das Alphabet, mit dem Gott die Welt geschrieben hat."
GALILEO GALILEI

Ohne mathematischen Formulierungen ist „moderne Physik" undenkbar. Der hohe Stellenwert der Mathematik ist aber schon in der Newton'schen Mechanik außerordentlich. Vor allem die Einführung der Differenzialrechnung hat zum Höhenflug der klassischen Physik geführt. Im Folgenden wird diese mathematische Schreibweise kurz vorgestellt.

1.3.1 Momentangeschwindigkeit als Differenzial

Angenommen ein Fahrzeug bewegt sich unterschiedlich schnell.

Zur Erfassung seiner jeweiligen Momentangeschwindigkeit v muss man in der Formel $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ möglichst kleine Zeitintervalle Δt betrachten.

Die jeweils zurückgelegte kleine Wegstrecke wird dann mit Δs bezeichnet. Im Grenzfall werden beide Differenzen „unendlich klein", man schreibt dann für solch ein **Differenzial** dt bzw. ds und der Differenzialquotient kann mit Hilfe der Differenzialrechnung (siehe **Mathematikunterricht**) bestimmt werden. Die **Momentangeschwindigkeit** *v*(*t*) zum Zeitpunkt t wird formal so angeschrieben:

$\mathbf{v(t) = \frac{ds}{dt}}$, sprich: „*v* von *t* ist gleich *ds* nach *dt*"

s in obiger Gleichung ist eine Funktion der Zeit: *s(t)*

s(t) ist eine Bewegungsgleichung, sie beschreibt den Ort (in einer Richtung) abhängig von der Zeit.

Weitere Schreibweisen für *v(t)*:

$\mathbf{v(t) = s'(t)}$ bzw. $\mathbf{v(t) = \dot{s}(t)}$ (Erste Ableitung nach der Zeit)

Analoges gilt für die **Momentanbeschleunigung**:

$\mathbf{a(t) = \frac{dv}{dt}}$, sprich: „*a* von *t* ist gleich *dv* nach *dt*"

oder $\mathbf{a(t) = v'(t) = s''(t)}$

bzw. $\mathbf{a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{s}(t)}$

(Erste bzw. zweite Ableitung nach der Zeit)

Weg s; Zeit t; 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10; 1 2 3 4 5 6 7

Abb. 9.1 *Im Weg-Zeitdiagramm wird die **Momentangeschwindigkeit** als **Steigung** der Tangente dargestellt.*

V = dx/dt; V = Ẋ; DIFFEREN GEIST LEIBNIZ; V = ΔY/ΔX; DIFFERENTIAL GEIST NEWTON

Abb. 9.2 *Unterschiedliche Schreibweisen der Differenzialrechnung*

Beispiel 1.1

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Das Weg-Zeit-Gesetz für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung lautet:

$s(t) = \frac{a}{2} \cdot t^2$

a) Die Momentangeschwindigkeit und

b) die Momentanbeschleunigung sollen bestimmt werden.

Wert für Beschleunigung: a = 3 m/s²

Zeitpunkt: t = 4,5 s

Nach den Regeln der Differentialrechnung ergibt sich:

a) $\mathbf{v(t)} = s'(t) = \left(\frac{a}{2} \cdot t^2\right)' = \frac{a}{2} \cdot 2 \cdot t = \mathbf{a \cdot t} \rightarrow \mathbf{v(t)} = 3\ \text{m/s}^2 \cdot 4{,}5\text{s} = \mathbf{13{,}5\ m/s}$

b) Für die Beschleunigung erhält man:

$\mathbf{a(t)} = v'(t) = (a \cdot t)' = a \rightarrow \mathbf{a(t) = 3\ m/s^2}$

a(t) ist zeitunabhängig, also **konstant**!

Abb. 9.3 *Newton beim „Wellenreiten auf seiner selbst entdeckten Tangentenfunktion"*

1.3.2 Der Weg als Integral

Schwere Lkw benötigen ein Kontrollgerät für die zuletzt gefahrenen **Geschwindigkeiten** (digitaler Tachograph, **Abb. 10.2**). Angenommen wir besitzen die Information über den zeitlichen Verlauf dieser Geschwindigkeit *v(t)*. Der in einem gewissen Zeitraum zurückgelegte Weg kann aus dem Diagramm bestimmt werden: Er entspricht dem Flächeninhalt unter dem Graphen im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm. Dies kann rechnerisch über das **Bestimmte Integral** erfolgen:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt$$

Abb. 10.1 *Der zurückgelegte Weg entspricht im Geschwindigkeits-Zeitdiagramm dem Flächeninhalt unter dem Graphen.*

Abb. 10.2 *Bildschirmanzeige eines digitalen Tachographen*

Abb. 10.3 *Die verrichtete Arbeit kann als Flächeninhalt unter dem Graphen im Kraft-Wegdiagramm bestimmt werden.*

1.3.3 Arbeit als Bestimmtes Integral

Die Arbeit, die benötigt wird um beispielsweise eine Feder gegen die Federkraft zu dehnen, kann mit Hilfe des Bestimmten Integrals berechnet werden.[1)] Die verrichtete Arbeit entspricht im Kraft-Weg-Diagramm dem **Flächeninhalt** unter dem Graphen:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F(s)ds$$

Beispiel 1.2

Nicht-lineare Feder

Progressive Federn zum Einbau in die Teleskopgabel eines Motorrads verbessern das Fahrverhalten. Das Kraft-Weggesetz sei parabelförmig: $F(s) = k \cdot s^2$. Zu berechnen ist die Arbeit die notwendig ist, um eine Feder vom entspannten Zustand 0 auf 12 cm zu stauchen. k = 600 N/cm

Nach den Regeln der Integralrechnung ergibt sich:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F(s)ds = \int_{s_1}^{s_2} ks^2 ds = k\frac{s^3}{3}\Bigg|_{0}^{12cm} =$$

$$= 600N/cm^2\left(\frac{(12\text{ cm})^3}{3} - 0\right) = 345\,600\ Ncm = 3\,456\ Nm \approx \mathbf{3{,}5\ kJ}$$

Abb. 10.4 *… ohne Worte*

[1)] Die einfache Formel Arbeit = Kraft · Weg (W = F ·s) – siehe **Band 1** – gilt nur für den Fall, dass die Kraft konstant bleibt und in Wegrichtung wirkt.

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen löst, kannst du Bewegungsgleichungen und Gesetze der Dynamik mit den Mitteln der Differenzialrechnung darstellen und Ergebnisse abschätzen und errechnen.

Ü 1.1 Die Wiener U-Bahn U2 durchläuft zwischen zwei Stationen annähernd folgende Bewegungsgleichung:

$s(t) = -0{,}01t^3 + 0{,}75t^2 - 0{,}3t$

a) Bestimme die Momentangeschwindigkeit und Momentanbeschleunigung mit Hilfe der Differenzialrechnung.

b) Welche Einheiten müssen die Koeffizienten haben? Annahme: Wenn die Zeit in Sekunden eingesetzt wird erhält man das Ergebnis für den Weg s(t) in Meter.

c) Welche Strecke hat die Bahn nach 25 Sekunden zurückgelegt? Welche Geschwindigkeit erreicht sie in dieser Zeit?

Ü 1.2 ***Alice in Wonderland:*** *"I wonder if I shall fall right through the earth!" mused Alice – as she tumbled down the rabbit-hole. Down, down, down. Would the fall never come to and end? "I wonder how many miles I've fallen by this time?" said she aloud, …"I wonder if I shall fall right through the earth! How funny it'll seem to come out among the people that walk with their heads downwards!"*

Könnte man in einem Tunnel mitten durch die Erde im freien Fall ohne Luftwiderstand fallen, dann würde man eine Pendelbewegung durchlaufen. Das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz hat die Form:

$v(t) = v_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ mit $v_{max} = 7{,}91 \cdot 10^3$ m/s und $\omega = 1{,}265 \cdot 10^{-3}\ s^{-1}$.

Bestimme den zurückgelegten Weg mit den Mitteln der Integralrechnung

a) im Verlauf der ersten Sekunde

b) im Zeitraum von 0 bis 21 Minuten.

Tipp: Rechne in Radiant!

Abb. 11.1 ***Alice:*** *„I wonder if I shall fall right through the Earth!"*

Ü 1.3 Um mit einem **Sportbogen** **(Abb. 11.2)** zu schießen, muss eine nicht gerade kleine Kraft und Energie aufgewendet werden, um den Bogen zu spannen. Das nicht lineare Kraftgesetz eines solchen Bogens **(Abb. 11.3)** kann experimentell bestimmt werden:

$$F(x) = 5{,}11\,\frac{kN}{m^3}\,x^3 - 6{,}57\,\frac{kN}{m^2}\,x^2 + 2{,}03\,\frac{kN}{m}\,x$$

Berechne mit Hilfe der Integralrechnung die Arbeit, die notwendig ist, um den Bogen auf 30 cm zu spannen.

Abb. 11.2 *Einsatz eines Sportbogens*

Abb. 11.3 *Kraft-Weg-Diagramm eines Compound-Bogens*

Ü 1.4 Judy hat folgende Strategie für ihre Jogging-Runde: Zuerst läuft sie sich 10 Minuten lang warm, danach forciert sie und läuft die letzten 10 Minuten schneller, so wie es **Abb. 11.4** idealisiert zeigt.

a) Formuliere eine einfache Strategie, die es ermöglicht den zurückgelegten Weg in den ersten 10, 20 und 30 Minuten zu ermitteln.

b) Formuliere mittels Integralrechnung eine Strategie, den zurückgelegten Weg bis zum Ende der 10. Minute zu berechnen. Stelle dazu den ersten Teil der stückweise stetigen Funktion v(t) als Funktion auf.

c) Schätze den zurückgelegten Weg bis zum Ende der 30. Minute schnell ab. Beachte, dass keine SI-Einheiten gegeben sind.

Abb. 11.4 *Geschwindigkeits-Zeitdiagramm*

2 Relativitätstheorien

In diesem Kapitel geht es um

- Raum und Zeit
- die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- das Relativitätsprinzip
- Zeitdilatation
- Längenkontraktion
- Masse und Energie
- Gravitation
- Schwarze Löcher

2.1 Raum und Zeit *(space and time)*

Wenn Naturwissenschafter/innen von Raum und Zeit sprechen, dann stellen sie sich auch die Frage, wie man diese Grundgrößen letztendlich **messen** kann. Wie kann man einem Ereignis einen bestimmten Ort und eine bestimmte Zeit zuordnen?

Dazu stellte sich Einstein im Idealfall ein **„vollkommenes" Bezugssystem** vor. Dieses besteht aus

- einem (eventuell) dreidimensionalen Maßstabsgitter

und

- synchronen Uhren, die an jedem Gitterpunkt positioniert sind.

Abb. 13.1 ***„Ideales Bezugssystem"***: *In einem Maßstabsgitter sind an jedem Gitterpunkt synchrone Uhren positioniert, an denen direkt an Ort und Stelle der Vorgang gemessen werden kann. Damit werden Laufzeitfehler ausgeschlossen.*

Um Messfehler zu verhindern, muss Folgendes beachtet werden:

- **Beobachtung an Ort und Stelle:** Beim Messen von einer Position aus passieren Fehler durch **Laufzeitdifferenzen** **(Abb. 13.2)**. Um dies zu verhindern, registriert der Beobachter die Uhrzeit eines Ereignisses direkt am Ort des Geschehens.
- **Maßstabsvergleich:** Nur zwei zueinander **ruhende** gleichgerichtete Maßstäbe am gleichen Ort können verglichen werden.
- **Uhrenvergleich:** Auch die Uhren sollten SYNCHRON laufen.

Das hier beschriebene **„vollkommene" Bezugssystem** mit den aufwendigen Messvorschriften scheint übertrieben und ist nicht immer möglich. So ist man sich natürlich bei der Beobachtung astronomischer Objekte im All bewusst, dass man in die Vergangenheit schaut.

Es zeigt sich aber, dass sogar für Alltagsprobleme obige Punkte beachtet werden müssen: Beispielsweise ist für die **Satellitennavigation (GPS)** eine präzise Zeitmessung Voraussetzung. Dazu müssen die verwendeten Atomuhren weltweit sehr genau synchronisiert werden.

Was ist Zeit?
Fragt man EINSTEIN, dann erhält man recht desillusionierende Antworten: „Für uns gläubige Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion."

Oder pragmatischer:
„Zeit ist, was eine Uhr misst."

Einsteins Zeit hat mit dem absoluten Zeitbegriff, wie er von Newton vorausgesetzt wurde, nichts mehr zu tun.

Was ist Zeit?
NEWTON hat die Zeit definiert als:
„Absolute, true and mathematical time, of itself, and from its own nature, flows equably without relation to anything external …"

Aber mit so einer **absoluten, vom Messen** unabhängigen Uhrzeit, wie Newton sie gesehen hat, funktioniert Physik nicht! Wie wir in den nächsten Kapiteln noch sehen werden.

Abb. 13.2 *Wir blicken in die* ***Vergangenheit****. Lichteindrücke, die gleichzeitig ins Auge gelangen, stammen von verschiedenen Ereignissen. Diese müssen aber nicht gleichzeitig stattgefunden haben.*

Merk & Würdig

Ein **Bezugssystem** (*frame of reference*) für die „alltägliche" Physik kann dein Klassenraum, kann euer Physiksaal mit den Messgeräten oder kannst einfach du selbst sein.

Ergänzung & Ausblick

- **Synchronisation:**
  Man stellt zwei (gleichartige) Uhren nebeneinander. Dann werden sie gleich eingestellt, also synchronisiert und an ihren Bestimmungsort gebracht. Bei diesem Vorgang ist eine Beschleunigung unvermeidlich. Das beeinflusst aber prinzipiell ihren Gang. **(Kapitel 2.5.2)**
  Eine besser geeignete Methode zur Synchronisation:
  Ein Lichtblitz wird in der Mitte zwischen den beiden Uhren abgegeben, dieser startet den Lauf beider Uhren **gleichzeitig** **(Abb. 14.1)**.

- **Gleichzeitigkeit:**
  In einem Bezugssystem sind zwei Ereignisse an verschiedenen Orten gleichzeitig, wenn sie von einer in der Mitte zwischen den Orten der Ereignisse liegenden Lichtquelle durch ein Lichtsignal erweckt werden könnten. (Die von zwei solchen Ereignissen ausgesendeten Lichtsignale erreichen einen Beobachter in der Mitte zwischen den Ereignissen gleichzeitig.)

Abb. 14.1 *Gleichzeitigkeit*

2.2 Bewegte Bezugsysteme *(moving reference frames)*

Die spezielle Relativitätstheorie (SRT) bezieht sich auf Vorgänge, die sich in verschiedenen, zueinander bewegten Bezugsystemen abspielen. Mit solchen Bezugssystemen beschäftigte sich schon Galilei.

Abb. 14.2 *Galileos Schiff*

… **über den Rand des Goldfischglases hinaus blicken!**

Vor etwa 400 Jahren hat Galilei begriffen, dass er mit einfachen Experimenten auf der Erdoberfläche nicht überprüfen konnte, ob die Erde sich bewegt oder ob sie still steht.

Galilei begründete dies folgendermaßen:

„Schließt Euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter dem Deck eines großen Schiffes ein. Verschafft Euch dort Mücken, Schmetterlinge und ähnliches fliegendes Getier; sorgt auch für ein Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen darin … Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgend welchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; … Nun lasst das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen: Ihr werdet – wenn nur die Bewegung gleichförmig ist und nicht hier- und dorthin schwankend – bei allen genannten Erscheinungen nicht die geringste Veränderung eintreten sehen."

Die Bewegung der Goldfische im Goldfischglas kann dir also keine Hinweise geben, ob und wie schnell sich das Schiff bewegt. Um die Schiffsbewegung zu sehen, muss man hinausblicken und das Wasser und den Hafen beobachten. Um die Erdbewegung zu sehen, muss man den Sternenhimmel betrachten. Mit andern Worten: Man muss ein zweites Bezugssystem zu Hilfe nehmen.

Inertialsysteme[1] *(inertial systems)*

Um die Sachlage nicht zu komplizieren beschäftigte sich Galilei mit besonderen Bezugssystemen, den Inertialsystemen:

Ein **Inertialsystem** ist ein Bezugssystem, in dem sich kräftefreie Körper geradlinig, gleichförmig bewegen. Verschiedene **Inertialsysteme** bewegen sich zueinander **geradlinig** und **gleichförmig**. (Sich drehende oder anders beschleunigte Bezugssysteme sind keine Inertialsysteme.)

Abb. 14.3 *Beispiel für ein (nicht ganz perfektes[2])* ***Inertialsystem****: Der Zug gleitet mit konstanter Geschwindigkeit v durch den Bahnhof.*

[1] „inert" (lat.) = „träge". In Inertialsystemen gilt das Trägheitsgesetz: Ein Körper verharrt in Ruhe oder geradlinig-gleichförmiger Bewegung, solange keine äußere Kraft auf ihn einwirkt.
[2] Die Erddrehung wird in diesem Beispiel außer Acht gelassen.

Klassisches Geschwindigkeitsadditionstheorem

In Inertialsystemen gilt: Objekte in einem bewegten Bezugsystem haben die Geschwindigkeit des Bezugsystems und ihre eigene Geschwindigkeit. Die bewegten Goldfische im Schiff tragen also die Geschwindigkeit des Schiffes in sich und haben zusätzlich noch ihre eigene Geschwindigkeit. Nur relativ zu einem äußeren Bezugssystem, beispielsweise vom Hafen aus, könnte ein Beobachter beide Geschwindigkeiten erkennen.

Merk & Würdig

Klassisches Additionstheorem für Geschwindigkeiten:

$u = \overline{u} + v$

$\overline{u}$ ... Geschwindigkeit eines Objekts aus der Sicht eines Beobachters im bewegten Bezugssystems,
v ... Geschwindigkeit des bewegten Bezugssystems,
u ... Geschwindigkeit des Objekts aus der Sicht des ruhenden Beobachters.

Hinweis: Diese Schreibweise gilt für den Fall, dass alle Geschwindigkeiten in dieselbe Richtung verlaufen.

Koordinatensystem $\overline{I}$ bewegt sich mit v in x-Richtung

Abb. 15.1 *Im Bezugssystem $\overline{I}$ wird eine Masse m mit der Geschwindigkeit $\overline{u}$ bewegt. Das Bezugsystem $\overline{I}$ bewegt sich bezüglich I mit der Geschwindigkeit v. Um die Sachlage zu vereinfachen, weist die konstante Geschwindigkeit v in x-Richtung. Laut Galilei gilt nun folgender klassischer Zusammenhang: Relativ zum Bezugsystem I ist die Masse mit* $u = \overline{u} + v$ *bewegt.*

2.2.1 Lichtgeschwindigkeit *(speed of light)*

Im Jahr 1881 begannen A. Michelson und E. W. Morley, die Geschwindigkeit des Lichts relativ zur Erdbewegung zu messen. Nach dem klassischen Additionstheorem für Geschwindigkeiten vermuteten sie: Relativ zum ruhenden Bezugsystem, dem Äther, sollte die Lichtgeschwindigkeit abhängig von der Richtung der Erdbewegung sein (im Winter: $c_0 + v$, im Sommer: $c_0 - v$).

Nach klassischer Auffassung brauchen auch elektromagnetische Wellen wie etwa Licht ein Trägermedium. Dieses wurde **Äther** (*aether*) genannt.

Eigenschaften des Äthers:

- Um die hohe Geschwindigkeit der Lichtausbreitung zu erklären, müsste der Äther **sehr starr** sein.
- Damit er bewegten Körpern kein Hindernis ist, müsste er auch **sehr dünn** sein.
- In allen anderen relativ zum Äther bewegten Bezugssystemen vermutete man eine andere Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Um dieses Äthermodell auch im Experiment zu überprüfen, wurden Messungen der Lichtgeschwindigkeit angestellt. Michelson erkannte, dass einfache Laufzeitmessungen dazu zu ungenau wären. Sein berühmtes Experiment, das er mit dem amerikanischen Chemiker E. W. Morley durchführte, beruhte auf seiner Entwicklung eines **Interferometers**.

Lichtquelle
Fixstern
Ruhesystem des Äthers

Abb. 15.2 *Äthermodell*

Experiment

Interferometer von Michelson[1)] und Morley

Das Prinzip:

Ein Lichtstrahl wird von einem halbdurchlässigen Spiegel HS in zwei Strahlen aufgeteilt:

- Der erste Strahl durchquert den halbdurchlässigen Spiegel, dann wird er nach einer bestimmten Strecke l_1 am Spiegel S_1 und danach am halbdurchlässigen Spiegel in Richtung Schirm S reflektiert.
- Der zweite Strahl wird nach der Strecke l_2 in Richtung Schirm reflektiert. Die beiden Strahlen interferieren.

Das Interferenzmuster lässt sich am Schirm beobachten. Es ist von der Länge der Wegstrecken und (laut Michelsons Annahme) von der Geschwindigkeit der Lichtquelle relativ zum „Ätherwinde" abhängig.

Dreht man das Michelson-Interferometer (bzw. wartet man, bis sich durch den Lauf der Erde um die Sonne die Richtungen ändern), dann müsste sich das Interferenzmuster ändern.

Abb. 16.1 *Interferometer*

Michelsons Annahme:

Die Erde bewegt sich durch den postulierten Äther mit der Geschwindigkeit v. Damit erwartete Michelson für die verschiedenen Lichtwege im Interferometer verschiedene Laufzeiten der Lichtstrahlen:

Zu Abb. 16.2

a) Geschwindigkeit parallel zur Erdbewegung:

$v + c_0$ bzw. $v - c_0$

b) Geschwindigkeit normal zur Bewegungsrichtung der Erde:

$\sqrt{c_0^2 - v^2}$

Somit wären die Lichtstrahlen in ganz bestimmter Weise **phasenverschoben**.

Es müssten sich je nach Position der Erde oder Stellung des Interferometers ganz gewisse Interferenzbilder ergeben.

Abb. 16.2 *Geschwindigkeit v der Erde relativ zum Ätherwind*

Ergebnis des Experiments: Egal in welche Richtung das Interferometer ausgerichtet ist, das Interferenzmuster ändert sich **nicht**!

Abb. 16.3 *A. MICHELSON*

[1)] ALBERT ABRAHAM MICHELSON (1852 Strelno, Deutschland (heute Strzelno, Polen) – 1931 Pasadena, Kalifornien), Physiker und Lehrer für Physik und Chemie. Studien in Berlin, Heidelberg und Paris. Ab 1893 war er Professor in Chicago. Sein Lebenswerk war das Messen mittels Interferometrie. Er war der erste US-Amerikaner, der den Physik-Nobelpreis gewann (1907).

Zusammenfassung

Galileis Alltagsphysik:	Licht
Ein roter Ball rollt im fahrenden Zug in Fahrtrichtung. Es gilt: Die Geschwindigkeit des Balls kann als Summe der Zuggeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Balls vom Bahnsteig aus beobachtet werden **(Abb. 17.1)**.	Schickt man aus einer fliegenden Rakete ein Lichtsignal hinaus ins All, dann gilt: Von jeden Beobachter außerhalb der Rakete wird das Lichtsignal mit Lichtgeschwindigkeit c_0 gemessen **(Abb. 17.2)**.
Abb. 17.1	Abb. 17.2

- Die Lichtgeschwindigkeit erweist sich als **vollkommen unabhängig** von der Geschwindigkeit einer Lichtquelle oder des Empfängers. Die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** wurde noch in vielen weiteren Experimenten bestätigt!
- Die **Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0** wurde zur Naturkonstanten erklärt und die SI-Einheit **Meter** wurde 1983 nun abhängig von der Sekunde neu definiert.
- Das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten im Zusammenhang mit Licht muss **ungültig** sein.

Diese scheinbar widersprechenden Erfahrungen waren ziemlich explosiv und führten am Beginn des 20. Jahrhunderts zu einem der größten Umdenkprozesse in der Physik. Hier kommt **Albert Einstein** ins Spiel …

Abb. 17.3

Übungen

Wenn du alles beantworten kannst, dann weißt du über Bezugssysteme Bescheid und du bist in der Lage, naturwissenschaftliche Vorstellungen nach ihrer sachlichen Richtigkeit zu hinterfragen!

Ü 2.1 **a)** Durch welches Experiment wurde das Newton'sche Additionstheorem für Geschwindigkeiten in Frage gestellt?

b) Der Äther ist

- ☐ eine chemische Verbindung
- ☐ ein hypothetisches Bezugssystem für Schallwellen
- ☐ ein durchsichtiges Medium, in dem sich Licht ausbreiten kann
- ☐ ein Mädchenname

c) Welchem Satz kannst du zustimmen?

- ☐ Gleichförmig bewegte Bezugsysteme haben eine absolute Geschwindigkeit, die konstant ist.
- ☐ Den Bewegungszustand von Inertialsystemen kann man nur relativ zu anderen angeben.
- ☐ Die Erde (und damit auch der Physiksaal) ist genau genommen kein Intertialsystem, weil sie rotiert.
- ☐ Die spezielle Relativitätstheorie beschäftigt sich mit Bewegungen in zueinander bewegten Inertialsystemen.

Ü 2.2 Erläutere in vollständigen Sätzen deine Meinung zu den folgenden Aussagen. Finde Argumente, die Anna-Carina und Bertholds Aussagen bekräftigen oder widersprechen.

Anna-Carina sagt: „Wenn schnell fliegende Raketen Licht ausstrahlen, dann muss das Licht insgesamt einfach eine höhere Geschwindigkeit haben. Das sagt einem doch der gesunde Menschenverstand!"

Bertold meint: „Ich glaube, dass man die Lichtgeschwindigkeit deshalb nicht überschreiten kann, da man es in der Praxis immer mit Luft, Glas oder Wasser zu tun hat, und dort ist die Lichtgeschwindigkeit sowieso langsamer."

Abb. 17.4

Die MAXWELL´SCHEN GLEICHUNGEN beschreiben mathematisch den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Größen.
Bildlich könnte man sagen: „Elektrizität und Magnetismus springen sozusagen abwechselnd übereinander hinweg“ (Induktionsprinzip) – und bei diesen – „Bocksprüngen … umarmen sie einander“ – wie es Maxwell ausdrückte.

Merk & Würdig

Einstein´sches Postulat von der **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit**:

Die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum ist in jedem beliebigen Inertialsystem unabhängig vom Bewegungszustand der Quelle konstant und hat den Wert c_0.

$c_0 = 2{,}99\,792\,458 \cdot 10^8$ m/s

2.2.2 Die Einstein´schen Postulate *(Einstein's postulates)*

Schon in seiner Jugend hat sich Einstein überlegt, wie sich Licht und wie sich elektrische und magnetische Phänomene ausbreiten.

Licht, Wärme und alle anderen elektromagnetischen Strahlungen konnten von Maxwell einheitlich beschrieben werden. Die Beschäftigung mit den **Maxwell´schen Gleichungen** war Einsteins Lieblingsthema. (Die dafür notwendigen Kenntnisse der Differenzialrechnung hat sich Einstein mit Hilfe seines Onkels Jakob angeeignet.)

Einstein ist auf das Postulat von der **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** weniger aufgrund von Experimenten gestoßen, sondern aufgrund eines Gedankenexperiments **(Abb. 18.1)**.

Einstein stellte sich folgende Fragen:

- Wie sieht Licht aus, wenn man hinterhereilt?
- Ist man letztendlich irgendwann genau so schnell wie Licht?
- Wie sieht still stehendes Licht aus?

Einstein kam dabei zum Schluss: **Licht existiert nur dann, wenn es sich vorwärts bewegt**.

Experiment

Einsteins Gedankenexperiment:
Läuft man neben einer **Lichtwelle** einher – möglichst mit Lichtgeschwindigkeit –, dann müssten mit den Vorstellungen der klassischen Physik die elektrischen und magnetischen Felder still stehen! Lichtwellen breiten sich aber aus, weil sich elektrische Feldstärke und magnetische Feldstärke verändern. Diese Veränderungen, diese „Bocksprünge“ wie es Maxwell ausdrückte (Zitat siehe links oben) sind aber für die elektromagnetischen Wellen existenziell.

Abb. 18.1

Ergänzung & Ausblick

IKONE DER PHYSIK

Albert Einstein, (1879, Ulm – 1955, Princeton, USA) Nach schulischen Problemen, die man auf den Umzug seiner Familie nach Italien zurückführen kann, studiert er an der Technischen Hochschule Zürich.

- 1902: Technischer Beamter am Patentamt Bern.
- 1905: Wichtige Veröffentlichungen in den „Annalen der Physik" zur Quantentheorie und zur Relativitätstheorie.
- 1909: außerordentlicher Professor für theoretische Physik an der Universität Zürich, danach erhält er Universitätsstellen in Prag und Zürich und 1914 den Ruf an die Preußische Akademie der Wissenschaften in Berlin. Er kann sich nun ausschließlich seiner Forschung widmen.
- 1915 formuliert er die „Allgemeine Relativitätstheorie“, die 1919 bei einer Sonnenfinsternis überprüft werden kann, was Einstein berühmt macht.
- Ab 1920 wird er aufgrund seiner jüdischen Herkunft in Deutschland angefeindet.
- 1921 erhält Einstein den **Nobelpreis für Physik**.

Abb. 18.2 *EINSTEIN*

Nach der Machtübernahme durch die NSDAP verlässt er Deutschland. Er erhält in den USA in Princeton eine Anstellung am *Institute for Advanced Studies*. Trotz seines grundsätzlichen Pazifismus unterzeichnet er 1939 eine Aufforderung an den amerikanischen Präsidenten, den Bau der Atombombe voranzutreiben (siehe **Zitat auf Seite 32**). Nach dem Abwurf der Atombomben über Japan 1945 engagiert sich Einstein für die friedliche Nutzung der Atomenergie. Einstein war eine wissenschaftlich, aber auch kulturell und politisch interessierte, schrullige Persönlichkeit, die zur Ikone der Physik wurde.

Aus dem Experiment **(Abb. 19.2)** folgert Einstein, dass keine „Absolute Ruhe" möglich ist und dass Vorgänge in gleichberechtigten Inertialsystemen jeweils nach denselben Gesetzen ablaufen. Dieses **Relativitätsprinzip** ist an sich nichts Neues. Neu ist, dass Einstein das Konzept auch auf die Elektrodynamik erweitert hat. Ursprünglich wurde das Prinzip von Newton für die Mechanik **(Abb. 19.1)** formuliert.

Abb. 19.1 *Die mit konstanter Geschwindigkeit fahrende Eisenbahn (links) und die Wiese (rechts) sind **gleichberechtigte Inertialsysteme**: Experimente laufen jeweils nach den gleichen Gesetzen ab. Die Beobachterin in diesen Systemen erlebt jeweils den gleichen Versuchsablauf.*

Merk & Würdig

Einstein'sches Relativitätsprinzip:

Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen dieselbe Form an. Es gibt kein physikalisch bevorzugtes (ausgezeichnetes) Inertialsystem.

Experiment

Der Magnet wird bewegt

Die Spule wird bewegt

Abb. 19.2 *Bewegt sich ein Magnet relativ zu einer Spule, so wird Spannung induziert. Dies passiert aber auch, wenn man die Spule bewegt und der Magnet ruht. Aus dem Betrag der Spannung lässt sich nicht erkennen, wie schnell bewegt wird.*

War Einstein tatsächlich der „Vater der Relativitätstheorie"?

Die Formulierung der **Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)** ist Albert Einstein zuzuschreiben, er benötigte für dieses Werk mit Unterbrechungen mehrere Jahre – die ART gilt als sein eigentliches Lebenswerk.

Einstein hatte aber auch durchaus eine gewichtige Rolle bei der Formulierung der **Speziellen Relativitätstheorie (SRT)**. Die spezielle Relativitätstheorie war 1905, wie er selbst sagt, reif zur Entdeckung gewesen (siehe Zitat unten). H. A. **Lorentz** und G. F. **Fitzgerald** haben schon (unabhängig voneinander) knapp vor Einstein die wesentlichsten Gleichungen (Lorentztransformation) veröffentlicht. Auch der Franzose J. H. **Poincaré** hat einige wesentliche Verbesserungen an den Arbeiten von Lorentz praktisch zeitgleich mit Einstein veröffentlicht. An der Ausarbeitung und Weiterentwicklung der Relativitätstheorie hatten auch **Planck** und vor allem **Minkowski** einen wesentlichen Anteil.

Planck gilt im Übrigen als jener Physiker, der die Bezeichnung **„Relativitätstheorie"** verwendet und damit verbreitet hat. (Einsteins Titel der ersten Veröffentlichung lautete „Zur Elektrodynamik bewegter Körper").

Wichtigen Einfluss auf Einstein hatten bei der SRT die fachlichen Gespräche mit seinem Freund Angelo **Besso**, einem Schweizer Ingenieur. Bei der ART wurde ihm wesentliche mathematische Unterstützung durch einen weiteren Freund, Marcel **Grossmann**, zuteil.

„Diese beiden Voraussetzungen (Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und Relativitätsprinzip) genügen, um zu einer einfachen und widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper zu gelangen (…). Die Einführung eines ‚Lichtäthers' wird sich insofern als überflüssig erweisen, …"

A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik, 1905

SCIENCE NEWS-LETTER

The Weekly Summary of Current Science

WORLD INTELLECTUAL LEADER

Abb. 19.3 ***Lorentz** hat sich 20 Jahre mit dem Problem der elektromagnetischen Wellen in bewegten Bezugssystemen beschäftigt.*

*Nach dem holländischen Physiker H. A. **Lorentz** wurde die **„Lorentzkraft"** (Kraft auf bewegte Ladungen im Magnetfeld) benannt.*

*„Es ist zweifellos, dass die spezielle Relativitätstheorie, wenn wir ihre Entwicklung rückschauend betrachten, im Jahre 1905 reif zur Entdeckung war. **Lorentz** hatte schon erkannt, dass für die Analyse der Maxwell´schen Gleichungen die nach ihm benannte Transformation wesentlich sei, und **Poincaré** hat diese Erkenntnis noch vertieft. Was mich betrifft, so kannte ich nur Lorentz´ bedeutendstes Werk von 1895 (…), aber nicht Lorentz´ spätere Arbeiten und auch nicht die daran anschließende Untersuchung von Poincaré. In diesem Sinne war meine Arbeit von 1905 selbständig. Was dabei neu war, war die Erkenntnis, dass die Lorentztransformation (…) das Wesen von Raum und Zeit im Allgemeinen betraf."*

Zitat: EINSTEIN

2.2.3 Bewegte Uhren *(moving clocks)*

Lichtuhr

Einstein liebte Gedankenexperimente. Einsteins Überlegungen beruhen auf dem Postulat von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Der Grundgedanke des Gedankenexperiments „Lichtuhr" ist folgender:

Durch ein Lichtsignal, das an zwei Spiegeln periodisch reflektiert wird, kann eine Lichtuhr ein periodisches Zeitsignal (Takt) erzeugen. Mit heutigen Technologien ist das Experiment vom Prinzip her tatsächlich durchführbar.

Experiment

Gedankenexperiment Lichtuhr

Albert hat eine besonders einfache „Lichtuhr" konstruiert. Sie besteht nur aus zwei Spiegeln, einer Blitzlampe und einer Vorrichtung zur Zeitablesung. Albert bewegt sich mit seiner Lichtuhr mit der Geschwindigkeit v nach rechts an der ruhenden Beobachterschar „Berta 1", „Berta 2", usw. vorbei.

Abb. 20.1 *Gedankenexperiment Lichtuhr*

Beide, Albert und Berta, beobachten den Weg des Lichts der Lichtuhr. Für die zwei Ereignisse „Tick" und „Tack" gilt …

… aus der Sicht des Systems $\bar{I}$ **(Abb. 20.1 links)**:

Albert misst zwischen den Ereignissen die Eigenzeit $\overline{\Delta t}$.

Die Strecke l wird in der Zeit $\overline{\Delta t} = \frac{l}{c_0}$ zurückgelegt.

$\Rightarrow$ **$l = c_0 \cdot \Delta\bar{t}$**

… aus der Sicht der ruhenden Beobachterinnen im System I **(Abb. 20.1 Mitte)**:

Das Licht legt aus der Sicht von Berta den längeren Weg $c_0 \cdot \Delta t$ zurück. Der Lichtimpuls benötigt zwischen denselben Ereignissen „Tiiick" und „Taaack" nun die Zeit Δt.

Mit Hilfe des Pythagoräischen Lehrsatzes **(Abb. 20.1 rechts)** folgt für die Wegstrecken: $l^2 + (v \cdot \Delta t)^2 = (c_0 \cdot \Delta t)^2$

Setzt man die Strecke **$l = c_0 \cdot \Delta\bar{t}$** ein, dann ergibt sich: **$(c_0 \cdot \Delta\bar{t})^2 + (v \cdot \Delta t)^2 = (c_0 \cdot \Delta t)^2$**

Nach der Eigenzeit **$\Delta\bar{t}$** aufgelöst erhält man: **$\Delta\bar{t} = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}$**

Umgestellt auf die Zeitdifferenz Δt, die von der Beobachterschar „Berta 1" und „Berta 2" gemessen wird, ergibt sich:

$$\Delta t = \Delta\bar{t} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}$$

Der Ausdruck mit der Wurzel wird üblicherweise als **Lorentzfaktor γ** bezeichnet, so dass man auch kürzer schreiben kann:

$$\Delta t = \Delta\bar{t} \cdot \gamma \text{ mit } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} \quad (\gamma \geq 1)$$

Da γ immer größer/gleich 1 sein muss, gilt $\Delta t \geq \Delta\bar{t}$

Die Gleichung kann etwas salopp aber einprägsam interpretiert werden mit: **„Bewegte Uhren gehen langsamer."**

- **Verallgemeinerung:** Die Zeitdilatation gilt nicht nur für Lichtuhren! Generell kann behauptet werden: **„Die Zeit vergeht in bewegten Systemen langsamer."** (Aus der Sicht des ruhenden Beobachters.)
- **Bei geringer Geschwindigkeit** ist die Zeitdehnung meist vernachlässigbar klein. Als gute Näherung sind daher die Zusammenhänge der klassischen Physik anwendbar.
- **Lichtgeschwindigkeit:** Wird für die Geschwindigkeit v die Lichtgeschwindigkeit eingesetzt, dann strebt die Zeit Δt gegen ∞! Eine mit Lichtgeschwindigkeit bewegte Uhr „bleibt stehen"!
- **Symmetrie:** Da es kein bevorzugtes Ruhesystem gibt, muss der Effekt symmetrisch sein. Das bedeutet, dass für eine Beobachterschar im System „Lichtuhr" die Uhren vom System „Boden" ebenfalls im selben Ausmaß verlangsamt erscheinen!
- **Experimenteller Nachweis:** Der direkte experimentelle Nachweis konnte erst etwa 50 Jahre später erfolgen. 1971 gelang der Nachweis mittels Atomuhren **(Abb. 21.2)**. Heute ist die Zeitdehnung ein Phänomen, mit dem sich Techniker täglich auseinandersetzen; etwa in Satelliten oder Teilchenbeschleunigern.
- **Der Lorentzfaktor γ:** Der Ausdruck v/c_0 ist oftmals sehr klein. Um die Rechnung mit dem Taschenrechner zu ermöglichen, kann folgende Näherung verwendet werden:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c_0^2} \text{ für } v/c_0 << 1$$

Abb. 21.1 ***Zeitdilatation:*** *Bewegt sich beispielsweise ein System 12 Jahre lang mit 80 % der Lichtgeschwindigkeit, dann wird diese Zeit aus der Sicht des ruhenden Beobachters auf 20 Jahre ausgedehnt. Bei einer Geschwindigkeit wie im Beispiel 2. 1 ist der Effekt sehr gering.*

Abb. 21.2 ***„Atomuhr an Bord":*** *Hafele und Keating überprüfen die SRT an Bord eines Verkehrsflugzeuges[1].*

Beispiel 2.1

Raumsonde auf dem Weg ins All

Die Raumsonde hat eine Geschwindigkeit von 70 000 km/h (ca. 20 km/s ≈ 0,007 % von c_0).

Der Bordcomputer schaltet für 12 Jahre (Sondenzeit) den Funkkontakt ab. Danach sollen die Uhren auf der Sonde und in der Bodenstation auf der Erde wieder synchronisiert werden.

Wie lange ist die Sonde aus der Sicht der Bodenstation Erde abgeschaltet?

$$\Delta t = \Delta\bar{t} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} = \Delta\bar{t} \cdot 1{,}0000000027 = \mathbf{12{,}000000027a}$$

Das bedeutet, dass aus Sicht der Bodenstation der Bordcomputer nach 12 Jahren um **0,83 s** „zu lang geschlafen" hat.

Merk & Würdig

Zeitdehnung (Zeitdilatation):

Bewegte Uhren gehen langsamer.

$$\Delta t = \Delta\bar{t} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} = \Delta\bar{t} \cdot \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} \geq 1$$

v … Relativgeschwindigkeit zwischen den Bezugssystemen
Δt … Zeitspanne vom ruhenden System aus gemessen.
$\Delta\bar{t}$ … Zeitspanne im bewegten System gemessen (**Eigenzeit**).
γ … Lorenzfaktor

[1] Die Auswertung des Experiments ist kompliziert. Da auch Beschleunigungseffekte und Gravitationseffekte berücksichtigt werden müssen, muss die ART mit einbezogen werden.

Das Zwillingsparadoxon *(the twin paradox)*

Abb. 22.1

Man stelle sich die Zwillinge Laurenz und Laura vor. Laura sei Raumfahrerin. Laura begibt sich auf eine Forschungsreise ins All, die Geschwindigkeit liegt dabei im Mittel bei 80 % von c_0. Laurenz bleibt dagegen zu Hause auf der Erde. Das Raumschiff wird nach **20 Erdjahren** wieder auf der Erde landen.

Wenn man für die Rückreise ebenfalls eine mittlere Geschwindigkeit von $0{,}8 \cdot c_0$ ansetzt, ergibt sich die Reisezeit aus der Sicht Lauras mit:

$\Delta\bar{t} = \Delta t \sqrt{1 - 0{,}8^2} = 20a \cdot 0{,}6 = \mathbf{12\ a}$

Laura ist also **8 Jahre weniger** gealtert als ihr Zwillingsbruder. (Während des Fluges im Raumschiff verlaufen auch Vorgänge wie Herzschlag oder Atemfrequenz von Laura langsamer.)

Positionswechsel: Wir verfolgen nun die Bewegung aus der Sicht Lauras:
Sie sieht wie sich die Erde bewegt. Folglich muss aus Symmetriegründen auch auf der Erde die Zeit langsamer vergehen!
Jeder der beiden Zwillinge vermutet also, dass der andere weniger altert …
Und das ist **paradox**!

Wer hat nun recht?
Der Widerspruch entsteht durch den Umkehrschluss:
Darf man tatsächlich davon ausgehen, dass die Situation aus beiden Sichtweisen vollkommen symmetrisch abläuft?

Damit die Zwillinge ihr Alter gleichzeitig am selben Ort vergleichen können, muss das Raumschiff umkehren. Dabei muss es **beschleunigen** und es wirken messbare **Trägheitskräfte**. Das Raumschiff befindet sich nacheinander in **zwei verschiedenen** Inertialsystemen. Die Situation läuft **nicht symmetrisch** ab.

Führt man die Rechnung mit den Mitteln der SRT (und der allgemeinen Relativitätstheorie für die Beschleunigungsphasen und Gravitation) durch, dann zeigt sich, dass der auf der Erde zurückgebliebene Zwillingsbruder mehr altert.

Übungen

Anhand der folgenden Übungen kannst du die grundlegenden Prinzipien der SRT fachgerecht ausdrücken und zum Thema Zeitdehnung Ergebnisse abschätzen und errechnen.

Ü 2.3 Die **Marsianer** ✌♌♍♒• und ✍🕭✍✓•⌨ befinden sich in ihrem Raumschiff, das sich mit halber Lichtgeschwindigkeit vom Mutterplaneten wegbewegt. Sie teilen ihrer Bodenstation mit, dass sie für 2 Stunden ein Nickerchen machen wollen.
Wie lang schlafen sie aus der Sicht ihres Mutterplaneten?

Ü 2.4 *Calculate the value of the* ***Lorentz factor*** *γ for a speed of*

a) *20 %*

b) *80 % and*

c) *99,9999999 % of the speed of light.*

Ü 2.5 Zu Abb. 22.2:
Diskutiere mit!

- Welche Aussagen sind im Kern richtig?
- Widersprich konstruktiv! Begründe deine Kritik.
- Welche Idee kannst du zusätzlich einbringen?

Abb. 22.2

2.2.4 Bewegte Maßstäbe *(moving scales)*

Ein weiterer Effekt ist eng mit der Zeitdilatation verknüpft. Tritt eine Zeitdehnung auf, dann muss sich auch die Länge verändern! Dies kann ebenfalls mit Hilfe eines Gedankenexperiments abgeleitet werden.

Experiment

Gedankenexperiment Längenmessung

Albert in der Rakete und Berta auf der Erde wollen die Länge der Rakete messen.

Albert misst die aus seiner Sicht **ruhende Länge** $\Delta\bar{x}$ mit Hilfe der Zeitdifferenz, die der Lichtstrahl benötigt, um die Länge zu überwinden. (Er verwendet also das Postulat von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit!)

Die Rechnung $\Delta\bar{x} = c_0 \cdot (t_{tick} - t_{tack})$ ist für Albert ein Kinderspiel.

Bei der Messung der Länge der **bewegten** Rakete hat **Berta** eine gute Idee: Sie bittet Albert, ihr die Laufzeit ($t_{tick} - t_{tack}$) des Signals zu verraten.

Berta hat Kapitel 2.2.3 gelesen und weiß, dass die Zeitdauer gedehnt ist. Sie verkürzt Alberts Zeitangabe, indem sie mit γ korrigiert. Für die Länge ergibt sich:

$$\Delta x = c_0 \cdot (t_{tick} - t_{tack})\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^{\,2}}} = \Delta\bar{x}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^{\,2}}}$$

Abb. 23.1

Da der Wurzelausdruck immer kleiner oder gleich 1 ist, folgt, dass die Rakete aus Bertas Sicht in Bewegungsrichtung **verkürzt** ist! Der Effekt wird daher **Längenkontraktion** genannt.

Berta beobachtet noch etwas:

Sie kann mit Hilfe eines zweiten Beobachters die Breite des Schattens der Rakete direkt durch Vergleich bestimmen, ohne mitlaufen zu müssen. Quer zur Bewegungsrichtung v tritt der Effekt der Längenkontraktion **nicht** auf.

Beispiel 2.2

Wie lang lebt ein Myon?

Myonen sind Teilchen, die entstehen, wenn die **kosmische Strahlung** auf die Atmosphäre der Erde trifft **(Abb. 23.2)**. Myonen sind **instabil**. Im Experiment wurde festgestellt, dass von 1 000 Myonen nach einer Zeit von $T_{½} = 1{,}52$ µs nur noch 500 Myonen vorhanden sind. Die Zeit $T_{½}$ nennt man **Halbwertszeit** **(Kapitel 4.5)**.

Typischerweise entstehen Myonen in einer Höhe von 10 km; ihre Geschwindigkeit beträgt im Mittel etwa $0{,}998 \cdot c_0$. Bei dieser Geschwindigkeit würden Myonen aber nur etwa $s = c_0 \cdot T_{½} = 450$ m zurücklegen. Dennoch können fast alle Myonen von Zählgeräten nachgewiesen werden.

Wie ist dies möglich?

Die Lebensdauer eines Myons wird aufgrund der Zeitdilatation aus der „Sicht der Erde" verlängert! So ergibt sich für die Halbwertszeit:

$$\Delta t = \Delta\bar{t}\,\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^{\,2}}}} = 1{,}52 \cdot 10^{-6}\,\text{s} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (0{,}998)^2}} = \mathbf{24\ \mu s}$$

In dieser Zeit können die meisten Myonen die Strecke von 10 km überwinden.

Aus der **„Sicht der Myonen"** schaut die Sache anders aus. Aus dieser Perspektive ruht das Myon und die **Halbwertszeit bleibt unverändert**. Hier kommt aber nun die **Lorentzkontraktion** ins Spiel. Die Strecke bis zur Erde wird aus der Perspektive der Myonen um den gleichen Faktor verkürzt, um den sich für einen Beobachter auf der Erde die Halbwertszeit der Myonen verlängert.

Abb. 23.2 *Bei der Wechselwirkung der* ***kosmischen Strahlung*** *(90 % Protonen) mit der Erdatmosphäre entstehen* ***Primärteilchen****. Diese zerfallen unter anderem in* ***Myonen (μ)*** *und Myon-Neutrinos (ν_μ). Myonen sind instabil und zerfallen in weitere Teilchen.*

Merk & Würdig

Längenkontraktion:

- Raum und Zeit sind miteinander zur **„Raumzeit"** verknüpft: Ist die Zeit gedehnt, dann ist der Raum gestaucht.
- Aus der Sicht eines ruhenden Beobachters erscheint ein bewegter Gegenstand in **Bewegungsrichtung verkürzt**.
- Quer zur Bewegungsrichtung tritt dieser Effekt nicht auf!

$$\Delta x = \Delta \bar{x} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}} = \Delta \bar{x} \cdot \frac{1}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} \geq 1$$

v … Relativgeschwindigkeit zwischen den Bezugssystemen
Δx … Länge in Bewegungsrichtung aus dem System gemessen, indem sich die Länge bewegt.
$\Delta \bar{x}$ … Ruhelänge

Abb. 24.2 ***Doppler-Effekt*** *bei Wasserwellen (bewegte Quelle).*

Abb. 24.3 *Die Auswirkungen des relativistischen Doppler-Effekts im Vergleich zum akustischen Doppler-Effekt.*

Übungen

Anhand der folgenden Übungen kannst du zum Thema Längenkontraktion Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 2.6 Ein **Myon** entsteht in 9 km Höhe in der Atmosphäre. Es nähert sich der Erde mit 99,5 % der Lichtgeschwindigkeit.

a) Welche Strecke liegt zwischen Myon und Erdoberfläche aus der „Sicht des Myons"?

b) Auf welchen Wert ändert sich die Halbwertszeit (1,52 μs) aus der „Sicht des Myonendetektors" auf der Erdoberfläche?

Ü 2.7 **Positronen:** Im Speicherring HERA **(Abb. 24.1)** mit einer Länge von 6336 m kreisen Positronen mit einer Geschwindigkeit 99,99999 % von c_0.

a) Welche Zeit benötigen Positronen für einen Umlauf aus der Perspektive des Kontrollzentrums von HERA bzw.

b) aus der „Sicht des Positrons"?

c) Welche Wegstrecke muss das Positron aus „seiner Sicht" pro Umlauf zurücklegen?

Abb. 24.1 ***Speicherring HERA****, DESY bei Hamburg*

2.2.5 Relativistischer Doppler-Effekt *(relativistic Doppler effect)*

Zur Erinnerung: Wenn sich Schallquelle und Beobachter relativ zueinander bewegen, registriert ein Beobachter eine Frequenzveränderung. Dieses Phänomen tritt – wie von Doppler[1] im Jahr 1842 vorausgeahnt – auch bei elektromagnetischen Wellen auf.

Der Unterschied zwischen akustischem und optischem Effekt ist, dass Licht im Gegensatz zu Schallwellen **keinen materiellen Träger** benötigt. Für den **optischen Doppler-Effekt** müssen die Formeln von Doppler relativistisch korrigiert werden, es ergibt sich:

$$f_B = f_Q \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c_0}}{1 - \frac{v}{c_0}}}.$$

v … Relativgeschwindigkeit zwischen der Quelle und dem Empfänger. v ist bei Annäherung mit positivem und bei Entfernung mit negativem Vorzeichen zu versehen.
f_B … Frequenz der Welle beim Beobachter mit Dopplerverschiebung
f_Q … Frequenz der Welle bei der Quelle ohne Dopplerverschiebung
c_0 … Vakuum-Lichtgeschwindigkeit

[1] CHRISTIAN DOPPLER (1803 Salzburg – 1853 Venedig), Mathematiker und Physiker.

Beispiel 2.3

Kosmische Geschwindigkeitsmessung

Oft wird der Dopplereffekt zur Geschwindigkeitsmessung herangezogen.

Der Barnardsche Pfeilstern ist schnell (Schau ins Internet!). Die Wellenlänge einer Linie der Balmer-Serie des H_2-Absorptionsspektrums **(Band 3, Kapitel 6)** dieses Sterns hat $\lambda_B = 656{,}22$ nm. Wird unter Laborbedingungen gemessen, erhält man $\lambda = 656{,}00$ nm. Wie groß ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Stern bewegt?

Die Beziehungen $f_Q = c_0/\lambda$ und $f_B = c_0/\lambda_B$ werden in die Formel des Dopplereffekts eingesetzt:

$$f_B = f_Q \cdot \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c_0}}{1-\frac{v}{c_0}}} \Rightarrow \frac{\frac{c}{\lambda_B}}{\frac{c}{\lambda}} = \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c_0}}{1-\frac{v}{c_0}}} \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_B} = \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c_0}}{1-\frac{v}{c_0}}}$$

Setzt man Zahlenwerte ein und substituiert man v/c vereinfacht sich die Gleichung:

$0{,}99966 = \sqrt{\frac{1+x}{1-x}}$. Stellt man auf x um ergibt sich: $x = -0{,}00034$

Rücksubstitution: $x = \frac{v}{c_0} \Rightarrow v = x \cdot c_0 = -0{,}00034\, c_0$

Der Stern entfernt sich mit etwa **102 km/s**.

Abb. 25.1 *Der relativistische Dopplereffekt kann zur Bestimmung der Geschwindigkeit von bewegten Lichtquellen benützt werden. Bewegt sich z. B. ein Stern von der Erde weg, führt dies zu einer Verringerung der Frequenz; das Spektrum des Sternenlichts wird zu größeren Wellenlängen hin verschoben.*

Dieser Effekt wird ***„Rotverschiebung" (red shift)*** *genannt. Bewegt sich die kosmische Lichtquelle auf die Erde zu, führt dies zu einer Verschiebung des Spektrums in den blauen Bereich.*

2.2.6 Relativistische Geschwindigkeitsaddition

(relativistic velocity addition)

„1 + 1 ist nicht 2"

Einsteins Postulat legt fest, dass die Geschwindigkeit eines Teilchens nicht überlichtschnell sein darf. Damit muss das klassische Geschwindigkeits-Additionstheorem ($u = \bar{u} + v$) korrigiert werden!

Abb. 25.2

Das System „Rakete" ($\bar{I}$) bewegt sich mit der konstanten Geschwindigkeit v in x-Richtung. In der Rakete fliegt der blaue Ball mit der Geschwindigkeit $\bar{u}$ bezogen auf „Albert" in dieselbe Richtung. Die relativistische Geschwindigkeitsaddition von $\bar{u}$ und v ergibt die Geschwindigkeit u des Balls aus der Sicht von „Berta" (I):

$$u = \frac{\bar{u} + v}{1 + \frac{v \cdot \bar{u}}{c_0^2}}$$

Merk & Würdig

Relativistischer Dopplereffekt:

$$f_B = f_Q \cdot \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c_0}}{1-\frac{v}{c_0}}}.$$

v … Relativgeschwindigkeit zwischen Quelle und Empfänger (bei Annäherung > 0).
f_B … Frequenz mit Dopplerverschiebung
f_Q … Frequenz ohne Dopplerverschiebung

Relativistische Geschwindigkeitsaddition:

$$u = \frac{\bar{u} + v}{1 + \frac{v \cdot \bar{u}}{c_0^2}}$$

u … Summe zweier parallel verlaufender Geschwindigkeiten.
v, $\bar{u}$ … zwei Geschwindigkeiten, die addiert werden sollen.

Durch Änderung der Vorzeichen von $\bar{u}$ oder v erhält man die Beziehung für die Subtraktion.

Beispiel 2.4

„Überlichtschnell"

Wir wollen die Formel der relativistischen Geschwindigkeitsaddition testen: Albert schaltet bei seiner Rakete das Licht ein. Wie schnell ist das Licht aus der Sicht Bertas, wenn die Rakete mit halber Lichtgeschwindigkeit auf sie zukommt?

$$u = \frac{\overline{u} + v}{1 + \frac{v \cdot \overline{u}}{c_0^2}} = \frac{c_0 + \frac{c_0}{2}}{1 + \frac{c_0 + \frac{c_0}{2}}{c_0^2}} = \frac{\frac{3c_0}{2}}{\frac{3}{2}} = \mathbf{c_0}$$

Man erkennt, dass der Term im Nenner verhindert, dass die Geschwindigkeit größer als c_0 wird.

Abb. 26.1

Übungen

Anhand der folgenden Übungen kannst du zum Thema Dopplereffekt und Addition von Geschwindigkeiten Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse abschätzen bzw. errechnen.

Ü 2.8 Überlege und schätze ab: Was passiert, wenn in den Formeln für den relativistischen Dopplereffekt und für die Geschwindigkeitsaddition der Wert der beteiligten Geschwindigkeiten im Vergleich zum Licht sehr klein ist?

Ü 2.9 Bestimme die Geschwindigkeit, mit der sich zwei **Photonen** einander nähern. (Kontrolliere deine Überlegung durch Einsetzen in die Formel!)

Ü 2.10 *Albert wants to catch up with a light wave. He chases after it with 0.9 % of c_0. Which speed does the light from Albert's point of view have now?*

Ü 2.11 **Radaranlage:** Zur Geschwindigkeitsmessung von Fahrzeugen werden Doppler-Radaranlagen eingesetzt. Das reflektierte Signal ist, da der Reflektor wie eine bewegte Quelle wirkt, **„dopplerverschoben"**. Aus der Dopplerverschiebung kann auf die Geschwindigkeit des Fahrzeuges geschlossen werden. Ein Kfz entfernt sich mit 130 km/h. Welche Dopplerverschiebung Δf des Radarsignals ergibt sich? Verwendete Frequenz: 10 GHz

Ü 2.12 Ein **Physikstudent** wird nach einer Ampelkreuzung von einer Polizeistreife angehalten. Ihm wird vorgeworfen, er habe mit seinem Kfz die Ampel bei Rotlicht (700 nm) überfahren. Der Student erklärt, dass für ihn aufgrund des Dopplereffekts die Ampel grün (400 nm) geleuchtet hat. Ist dies möglich? (Berechne die nötige Geschwindigkeit.)

Ü 2.13 ***Red shift:*** *The spectral lines emitted by hydrogen gas in cosmic clouds are often observed red shifted. The spectral line emission, normally found at a wavelength of 21 centimetres on Earth, might be observed at 21.1 cm instead. How fast is the gas in that example?*

Abb. 26.2

Wie sieht ein relativistisch bewegter Körper eigentlich aus?

Was sieht Berta, wenn ein Würfel mit relativistischer Geschwindigkeit vorbeifliegt? **(Abb. 26.2)** Für die Beantwortung der Frage müssen verschiedene Überlegungen miteinbezogen werden:

- **Längenkontraktion** in Bewegungsrichtung
- **Dopplereffekt:** Die Rot- bzw. Blauverschiebung des Spektrums
- **Laufzeiteffekte:** Von weit entfernten Punkten (z. B. dem rückwärtigen Teil des Würfels) braucht das Licht länger. Die Strahlen, die uns gleichzeitig erreichen, haben zu verschiedenen Zeiten mit ihrer Reise begonnen. Wir sehen daher die rückwärtigen Teile des Würfels in einer „älteren" Position. Die Vorderseite ist in der Zwischenzeit in einer neuen Position. Der Würfel wirkt daher verdreht und verzerrt.
- **Headlight effect** („Scheinwerfer-Effekt"): Nähert sich die Lichtquelle, dann treffen bei relativistischer Geschwindigkeit mehr Photonen pro Zeiteinheit den Beobachter. Ursache: Die Abstände zwischen den emittierten Photonen unterliegen der Lorentzkontraktion. Das Licht wird daher nach vor konzentriert.

Bei der Beobachtung mancher astronomischer Objekte müssen solche Effekte berücksichtigt werden!

2.2.7 Elektromagnetismus *(electromagnetism)*

Fließende Elektronen im Metalldraht weisen eine mittlere Geschwindigkeit (Driftgeschwindigkeit) von etwa 1 cm pro Minute auf. Daher müsste eine extrem kleine[1] **Lorentzkontraktion** vorhanden sein. Diese Verdichtung der Ladung führt zu Kräften, die man (relativ vom Bezugssystem) als **magnetische** oder **elektrische** Kraft bezeichnet:

Abb. 27.1 ***Links aus der Sicht des Ruhesystems Leiterdraht:*** *Die Kraft F auf die bewegte Ladung q wird als* ***magnetische*** *(Lorentz-)Kraft[2] bezeichnet.* ***Rechts:*** *Aus der Sicht der bewegten Ladung q bewirkt die relativistische Längenkontraktion eine Erhöhung der Ladungsdichte und Feldstärke. Die Kraft F zwischen der Ladung q und dem elektrischen Feld der Leiter ist die* ***elektrische*** *Kraft.*

Abb. 27.2 *Bewegt sich ein elektrisch geladenes Teilchen, dann erscheint aus der Sicht eines ruhenden Beobachters das elektrische Feld durch die* ***Lorentzkontraktion*** *gestaucht. Quer zur Bewegungsrichtung erhöhen sich die Feldliniendichte und damit die Stärke des elektrischen Feldes. Dieser Effekt ist experimentell nachweisbar!*

Relativität erklärt den Elektromagnetismus

Ob eine Kraft als magnetische oder als elektrische Kraft gedeutet wird, ist wie **Abb 27.1** zeigt abhängig vom Bezugssystem!

Universell

Auf Seite 7 im **Kapitel 1.1** wurde bemerkt, dass Theorien nach Möglichkeit **viele verschiedene** Phänomene erklären, also universell sein sollen. Der Elektromagnetismus ist ein Beispiel für solch eine Theorie. Die relativistische Behandlung der elektrischen und magnetischen Phänomene ermöglicht es, die elektrische und magnetische Kraft zum **Elektromagnetismus** zu vereinigen[3].

Merk & Würdig

- Die **elektrische Ladung** ist vom **Bezugssystem unabhängig**!
- **Relativität:** Ob eine Kraft als **elektrische Kraft** oder als **magnetische Kraft** erscheint, ob die elektrische oder die magnetische Kraft dabei überwiegt, hängt von der Wahl des Bezugssystems ab.
- **Invarianz:** Beide Kräfte zusammen, die **Kräfte des elektromagnetischen Feldes**, sind unabhängig vom Bezugssystem.
- **Lichtgeschwindigkeit:** Die relativistische Verknüpfung des elektrischen mit dem magnetischen Feld zeigt sich auch darin, dass die wichtigsten Konstanten miteinander in Zusammenhang stehen:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

$\mu_0 = 1{,}2566 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am (mag. Feldkonst.)

$\varepsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}$ As/Vm (el. Feldkonst.)

[1] Bei solch einer geringen Geschwindigkeit verwundert es, dass relativistische Erscheinungen merkbar werden. Der relativistische Korrekturfaktor beträgt etwa 1,000 … 001 (27 Nullen!) – dies „wirkt" erst ab der 27. gültigen Ziffer. Weil aber extrem viele Ladungsträger (~10^{23} pro cm^3) unterwegs sind, führt dies zu den bekannten alltäglich wirkenden elektromagnetischen Kräften!

[2] **Lorentzkraft F = q · F · B**, siehe **Band 3, Kapitel 8.6**. Die Bezeichnung „Lorentzkraft" geht auf denselben Physiker zurück, der auch die Lorentzkontraktion entdeckt hat.

[3] JAMES CLERK **Maxwell** vereinigt auf rein mathematischem Weg das magnetische und elektrische Feld schon 1861 bis 1864 in den nach ihm benannten Gleichungen.

2.3 Masse und Energie *(mass and energy)*

Experiment

Gedankenexperiment „Speed limit c_0"

Albert benützt ein Raumschiff mit einem futuristischen „*g-Antrieb*": Diese Kraftquelle ermöglicht eine konstante Beschleunigung in der Größe der Erdbeschleunigung. Eine konstante Kraft mit dem entsprechenden Impulszuwachs ($\Delta p = F \cdot \Delta t$) würde nach etwa einem Jahr[1] das Raumschiff **überlichtschnell** machen.

Die Schlussfolgerung dieses Gedankenexperiments steht natürlich im Widerspruch zum Einstein'schen Postulat, wonach die Lichtgeschwindigkeit nicht überschritten werden kann.

Angenommen, der Widerstand eines Körpers (seine **Trägheit**) wird bei hohen Geschwindigkeiten sehr groß, dann wäre das Überschreiten der Lichtgeschwindigkeit „sehr beschwerlich". Das führt zu folgender Frage:

Ist die Trägheit eines Körpers tatsächlich eine absolute Größe?

Experiment

Gedankenexperiment „Alberts Fehltritt"

Abb. 28.1

Aus der Sicht Alberts ($\bar{I}$):

Ein Ball mit der **Ruhemasse m_0** fliegt mit konstanter Geschwindigkeit[2] $\bar{u}$ in ***y*-Richtung**.

Der Ball zerstört das Fensterglas. Dabei hat der Ball einen Teil seines Impulses $\bar{p} = m_0 \cdot \bar{u}$ übertragen. Das Ausmaß des Schadens ist auch ein Maß für diesen Impuls.

Aus der Sicht Bertas (I):

Das Szenario „Albert, Fenster und Ball" ist bezüglich „Bertas" Bezugsystem in x-Richtung mit **relativistisch hoher** Geschwindigkeit (-) v bewegt.

In ***y*-Richtung** erscheint die Szene aufgrund der Zeitdilatation „in Zeitlupe":

$$u = \bar{u}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}$$

Der Ball verursacht natürlich in beiden Bezugssystemen denselben Schaden (zerbrochene Scheibe). Daher ist der für das Schadensausmaß verantwortliche Impuls $\bar{p} = m_0 \cdot \bar{u}$ in beiden Systemen gleich groß. Setzt man die Impulse gleich, ergibt sich:

$$p = \bar{p} \Rightarrow m \cdot u = m_0 \cdot \bar{u} \Rightarrow m \cdot \bar{u}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}} = m_0 \cdot \bar{u} \Rightarrow \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} = m > m_0$$

Die Masse m ist aus Sicht des **bewegten** Beobachters bzw. der Beobachterin **vergrößert**!

[1] $\left(t = \frac{c_0}{10 \frac{m}{s^2}} = 3 \cdot 10^7\, s \approx 1a \right)$

[2] Die Geschwindigkeit u des Balls sei klein; damit fallen keine relativistischen Korrekturen in diese Richtung an.

Der Impuls ist ein **Vektor**. Im dargestellten Gedankenexperiment wurde nur eine Komponente betrachtet. Grundsätzlich gilt:

- Der **relativistische** Impuls ist eine **Erhaltungsgröße** (siehe **Seite 34** und **Seite 47**)!
- Bei kleinen Geschwindigkeiten ($v << c_0$) lässt sich die relativistische Masse m von der Ruhemasse m_0 kaum unterscheiden.
- Bei großen Geschwindigkeiten nimmt die Masse zu.

Die Aussage der SRT bezüglich der Masse konnte in vielen Experimenten überprüft werden.

Abb. 29.1 *Der weltweit größte Teilchenbeschleuniger* ***LHC*** *(Large Hadron Collider) wird von CERN (European Organization for Nuclear Research) in der Nähe von Genf betrieben.*

Teilchenbeschleuniger (*particle accelerator*):

Besonders stark macht sich die Massenzunahme für Elementarteilchen in Teilchenbeschleunigern bemerkbar. Beispielsweise werden im leistungsstärksten Beschleuniger der Welt, dem LHC **(Abb. 29.1)**, Protonen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit aufeinander geschossen. Starke Kräfte halten die wegen ihrer hohen Geschwindigkeit nun massereichen Teilchen auf der Kreisbahn **(Beispiel 2.5)**.

Beispiel 2.5

Large Hadron Collider (LHC)

Im LHC werden Protonen durch elektrische Felder beschleunigt und erreichen eine Geschwindigkeit von 99,9999991 % von c_0. Ein Magnetfeld hält die Teilchen auf einer Kreisbahn (Umfang ca. 27 km).

Die notwendige magnetische Feldstärke ist direkt proportional zur Masse der Teilchen. Zu berechnen ist die relativistische Massenzunahme.

(Protonenmasse $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg)

Relativistische Korrektur der Masse:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 0{,}999999991^2}} = \mathbf{7\,454 \cdot m_0}$$

Bei Beschleunigung auf beinahe Lichtgeschwindigkeit erhöht sich die Masse. Das erforderliche Magnetfeld muss ca. 7 500-mal stärker sein als für nicht relativistische Geschwindigkeiten.

Hinweis: Um solch hohe Magnetfelder zu erzielen, setzt man eine große Anzahl supraleitender Magnete mit einer magnetischen Flussdichte B von bis zu 9 Tesla ein.

Abb. 29.2 *Arbeiten am magnetischen System des LHC*

Übungen

Anhand der folgenden Übungen kannst du im Zusammenhang mit bewegter Masse Argumente fachgerecht formulieren, Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse abschätzen bzw. errechnen.

Ü 2.14 Ein **Elektron** hat eine Ruhemasse von $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg. Bestimme
a) die relativistische Masse
b) den Impuls bei einer Geschwindigkeit von $0{,}9 \cdot c_0$.

Ü 2.15 **Schwergewicht:** Auf welche Geschwindigkeit muss ein Teilchen beschleunigt werden, damit seine relativistische Masse zehnmal so groß wird wie seine Ruhemasse?

Ü 2.16 ***Estimate*** *the mass your body would have if you travelled at 0.999 · c_0. Bearing in mind that you are actually travelling at this speed relative to some distant galaxy, explain why you don't in fact feel this extra massiveness.*

Merk & Würdig

Relativistische Masse *m*:

Ein Körper mit einer **Ruhemasse** (*rest mass*) m_0 hat bei einer Bewegung mit der Geschwindigkeit v eine relativistische (oder **dynamische**) Masse *m* für die gilt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}} = m_0\,\gamma$$

2.3.1 Wie schwer ist Energie? *(what's the mass of energy)*

Die bekannteste Formel der Welt lautet: **E = mc²**

Mit dieser Formel verbinden auch Menschen, die wenig Interesse an Naturwissenschaften haben sofort Begriffe wie Atomenergie oder Relativitätstheorie. Mehr zu dieser Formel erfährst du in diesem Abschnitt.

Energie im „Goldfischglas“

- Albert betrachtet Fische im Goldfischglas. Er schließt daraus: Die Masse der Fische ist gemäß der Formel $m = m_0 \cdot \gamma$ größer, wenn die Fische in Bewegung sind. Folglich müsste ein Goldfischglas mit sehr lebendigen Fischen schwerer sein als ein Glas mit ruhenden Fischen. Bewegungsenergie müsste sich als Massenzunahme zeigen. Berta argumentiert, dass die Fische langsam schwimmen und der Faktor γ praktisch gleich 1 ist.
- Berta trinkt gerne heißen Kaffee. Wärmeenergie ist Bewegungsenergie der kleinsten Teilchen. Berta meint, dass die Kaffeeschale auf eine sehr genaue Waage gestellt einen Gewichtsunterschied zwischen kaltem oder heißem Kaffee anzeigen müsste. **(Beispiel 2.6)**
- Wir betrachten superschnelle Elementarteilchen, die im Teilchenbeschleuniger fliegen. Die kinetische Energie dieser Teilchen macht sie wesentlich schwerer. **(Beispiel 2.5)**

Verallgemeinert kann man sagen: **Jede Energie hat Masse!**
Wie viel? Das kann man mit etwas Mathematik ausrechnen:

Abb. 30.1 ***Masse wird Energie!***
*Am 1. Nov. 1952 zündeten die USA auf einem Atoll der Marshall-Inseln die erste **Wasserstoffbombe**. Der Sprengsatz „Mike“ war mit 10 Megatonnen etwa 70-mal so stark wie die Atombombe von Hiroshima. Die Insel verschwand, an ihrer Stelle klafft unter Wasser ein kilometerbreiter Krater.*

Ergänzung & Ausblick

Relativistische Energie

Wir gehen von der relativistischen Massenformel $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}$ aus und vereinfachen sie, indem wir den Ausdruck $\frac{v^2}{c_0^2}$ durch x ersetzen: $m = m_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-x}}$. Man kann für $\frac{1}{\sqrt{1-x}}$ auch die Taylorreihe anschreiben: $1 + \frac{1}{2}x + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}x^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6}x^3 + \ldots$,

Somit ergibt sich: $m = m_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c_0^2} + \frac{3}{8}\frac{v^4}{c_0^4} + \frac{15}{48}\frac{v^6}{c_0^6} + \ldots\right)$.

Multipliziert man die Gleichung mit c_0^2 erhält man:

$$mc_0^2 = m_0 c_2 + m_0 \frac{v^2}{2} + m_0 \frac{3v^4}{8\,c_0^2} + m_0 \frac{15v^6}{48\,c_0^4} + \ldots$$

Alle Summanden in dieser Gleichung haben die Einheit der Energie.
Die Gleichung kann als **Energiebilanz** gedeutet werden:

- Links steht die **Gesamtenergie**

  $E_{ges} = m \cdot c_0^2$

- Rechts stehen Ausdrücke, die von der Geschwindigkeit abhängen: $m_0 \frac{v^2}{2} + m_0 \frac{3v^4}{8\,c_0^2} + m_0 \frac{15v^6}{48\,c_0^4} + \ldots E_{kin}$

  Diese Summe wird daher als (relativistische) **kinetische Energie E_{Kin}** bezeichnet.

  $\mathbf{E_{Kin} = E_{ges} - m_0 c_0^2 = (m - m_0) \cdot c_0^2}$

- **Ruheenergie:** All die Summanden der relativistischen Energie verschwinden für v = 0! Im Ruhezustand bleibt rechts nur der Term **$E = m_0 c^2$** übrig. Dieser wird als Ruheenergie (*rest energy*) bezeichnet.

Abb. 30.2 Ausschnitt aus Einsteins Manuskript (Universität Jerusalem): Die Seiten zeigen Teile der Ableitung der relativistischen Energie.

Massen-Energie-Äquivalenz *(mass-energy equivalence)*

- Energiezufuhr **erhöht** die Masse. Wird beispielsweise dem Wasser innere Energie in Form von Wärme zugeführt, dann erhöht sich auch die Masse des Wassers. (Wie man berechnen kann, ist der Effekt allerdings unmessbar klein, **Beispiel 2.6**.)
- Umgekehrt kann aus Energie Masse **erzeugt** werden, wie es in Teilchenbeschleunigern milliardenfach nachgewiesen wurde.
- **Massendefekt** (siehe auch **Kapitel 4.4**)
  Gibt ein Körper die Energie ΔE ab, so verringert sich seine Masse:
  $$\Delta m = \frac{\Delta E}{c_0^2}$$
  Die „gewaltigen Folgerungen“ dieser einfachen Gleichung liegen in dem großen Wert von $c_0^2 = 9 \cdot 10^{16} (m/s)^2$. Daher„schlummert“ eine enorme Energiemenge in jeder Masse.
- **Atomenergie**
  Es zeigt sich, und das ist entscheidend, dass jeder Form von Energie Masse zugeschrieben werden kann: Also auch chemische Energie oder Bindungsenergie der Nukleonen im Atomkern (Atomenergie). Der Massendefekt wird vor allem bei Kernreaktionen wie Kernspaltung **(Abb. 31.1)** und Kernfusion beobachtet **(Abb. 31.2** und **Kapitel 4.6.6)**.
- **Massen-Eneregie-Äquivalenz:** Verkürzt kann man sagen: Jede Energie hat Masse und umgekehrt, oder noch bündiger:
  $$E = mc^2$$

Abb. 31.1 ***Massendefekt:*** *Die entstandenen Bruchstücke nach der* ***Kernspaltung*** *(****Kernfission****) eines Urankerns haben zusammen weniger Masse als die ursprüngliche Masse. Die Massendifferenz (der Massendefekt) wird in Form von Energie freigesetzt.*

„… Das Relativitätsprinzip verlangt nämlich, dass die Masse direkt ein Maß für die im Körper enthaltene Energie ist; … Eine merkliche Abnahme der Masse müsste beim Radium erfolgen. Die Überlegung ist lustig und bestechend; aber ob der Herrgott nicht darüber lacht und mich an der Nase herumgeführt hat, kann ich nicht wissen.“ EINSTEIN

Beispiel 2.6

Wie schwer ist heißer Kaffee wirklich?

Die Massen-Energie-Äquivalenz in Alltagssituationen soll getestet werden. Wie stark wirkt sich die Massenerhöhung aus, wenn ein 1/4 Liter Wasser von 10 °C auf 80 °C erwärmt wird?

Die Wärmeenergie Q beträgt:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0{,}25\ \text{kg} \cdot 4{,}2\ \frac{\text{kJ}}{\text{Kkg}} \cdot 70\ \text{K} = 74\ \text{kJ}$$

Der Massenzuwachs Δm ergibt sich mit:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c_0^2} = \frac{74\ \text{kJ}}{9 \cdot 10^{16}\ (\text{m/s})^2} = \mathbf{8{,}2 \cdot 10^{-13}\ kg}$$

Die Massenerhöhung ist unmessbar klein.

Merk & Würdig

Masse und Energie sind Äquivalent:

$$E = mc_0^2$$

- Jeder Energie kann man Masse zuschreiben.
- Energiezufuhr erhöht die Masse und umgekehrt.

Massendefekt: $\Delta m = \frac{\Delta E}{c_0^2}$

E … Energie; *[E] = J*
m … Masse; *[m] = kg*
c_0 … Lichtgeschwindigkeit; $[c_0] = m/s$

Beispiel 2.7

Wasserstoffbombe

Im Jahr 1961 wurde von der UdSSR die größte jemals getestete Wasserstoffbombe gezündet. Die Sprengkraft betrug etwa 50 Megatonnen TNT-Äquivalent (50 MT). Wie viel Masse wurde damals in Energie umgewandelt?

Der **Sprengkraft** von einer Megatonne TNT-Äquivalent (abgekürzt: MT) entspricht einer freiwerdenden Energie von $4{,}2 \cdot 10^{15}$ J.

Die freiwerdende Energie von 50 MT entspricht: $E = 2{,}1 \cdot 10^{17}$ J

Massenäquivalenz: $\Delta m = \frac{\Delta E}{c_0^2} = \frac{2{,}1 \cdot 10^{17}\ \text{J}}{9 \cdot 10^{16}\ (\text{m/s})^2} = \mathbf{2{,}3\ kg}$

Abb. 31.2 ***Test einer Wasserstoffbombe:*** *Eine enorme Energiemenge wird frei. Sie entspricht dem Massendefekt, der bei der* ***Kernfusion*** *auftritt.*

Abb. 32.1 ***Hiroshima*** *nach dem Atombombenabwurf 1945*

„Meine Beteiligung bei der Erzeugung der Atombombe bestand in einer einzigen Handlung: ich unterzeichnete einen Brief an Präsident Roosevelt, in dem die Notwendigkeit betont wurde, Experimente im Großen anzustellen zur Untersuchung der Möglichkeit der Herstellung einer Atombombe. … die Wahrscheinlichkeit, dass die Deutschen am selben Problem mit Aussicht auf Erfolg arbeiten dürften, hat mich zu diesem Schritt gezwungen. Es blieb mir nichts anderes übrig, obwohl ich stets ein überzeugter Pazifist gewesen bin. Töten im Krieg ist nach meiner Auffassung um nichts besser als gewöhnlicher Mord."

EINSTEIN1952

Thema & Gesellschaft

Die Atombombe – Wissenschaft und Verantwortung

Geschichte im Zeitraffer *(fast forward through history)*

- **2. Weltkrieg, Manhattan Projekt** (1942 – 1946) USA, UK, Kanada: 130 000 Mitwirkende in 30 Forschungs- und Produktionsstätten. Zusammenbau der A-Bombe. Erster Test am 16. 7. 1945 in Los Alamos. Wissenschaftliche Leitung: J.R. Oppenheimer
- **Zerstörungswirkung** der A-Bombe: Die Städte Hiroshima (6. 8. 1945) und Nagasaki (9. 8. 1945) werden vollständig zerstört. Die zwei Atombombenexplosionen töteten insgesamt etwa 92 000 Menschen sofort. Weitere 130 000 Menschen starben bis Jahresende an den Folgen des Angriffs, zahlreiche weitere an Folgeschäden in den Jahren danach.
- **Entwicklung in der Sowjetunion:** Bis Ende des 2. Weltkriegs keine eigene Forschung, danach startete die Atomwaffenproduktion.
- Ab Beginn des **Kalten Krieges** (1947) Aufbau eines **„Gleichgewichts des Schreckens"**. Atomwaffentests von Sowjetunion, Großbritannien, USA, und anderen.
- **Russel-Einstein-Manifest 1955** und **„Göttinger Erklärung" 1957**: Bekannte Wissenschafter veröffentlichen Resolution gegen Atomwaffen.
- **Heutiger Stand:** Nukleare Bedrohung ist geringer geworden, aber nicht verschwunden. Das Wissen um die Herstellung der Atomwaffen ist bekannt und ein bleibendes Problem. Generell sind durch den wissenschaftlichen Fortschritt neue Massenvernichtungswaffen (z. B. mit Krankheitserregern) denkbar.

Abb. 32.2 *Der italienisch-amerikanische Physiker Enrico Fermi neben „seiner" Atombombe, der ersten Atombombe der Welt. Sie explodierte an einem Montagmorgen im Juli 1945 in der Wüste in New Mexiko.*

Das große Schuldgefühl:

Nach dem Einsatz der Atombomben in Japan begann eine generelle Diskussion über verantwortungsvolles Handeln in Wissenschaft und Technik. Können Naturwissenschafter und Techniker überhaupt die Politik beeinflussen? Sind Physiker, beispielsweise die Entdecker der Kernspaltung, dafür verantwortlich, was Strategen daraus machen?

Die Wissenschaft hat keine Moral!

Der Staat entscheidet über die Anwendung - nicht die Wissenschaftler

Was ist, wenn der Staat falsche Vorgaben macht, und der Wissenschafter es besser weiß?

Selbst die beste Regierung kann einmal eine falsche Entscheidung treffen

Ein Techniker wäre nur verantwortlich, wenn die Folgen vorhersehbar sind

Verantwortung trägt jeder! Auch das letzte Glied der Handlungskette

Wenn wir die "Bombe" nicht bauen, dann baut sie eben ein Anderer

Verantwortung haben die, die an den wesentlichen Schaltpunkten sitzen

Der Mensch hat immer schon geforscht sonst würden wir noch in den Höhlen sitzen

Die Wissenschaft entwickelt sich viel schneller weiter, als die menschliche Moral.

Vielleicht sollte sich die Wissenschaft mehr mit der Moral befassen?

Abb. 32.3 *Nimm dazu Stellung! Finde eigene Argumente!*

Antimaterie *(antimatter)*

1928 entwickelte Paul A. M. Dirac[1] eine Gleichung, die unter anderem Elektronen beschreibt. Sie hat sowohl Lösungen mit positiver Energie als auch mit negativer Energie. Teilchen mit negativer Energie müssten in der Zeit rückwärts laufen. Mathematisch ist dies äquivalent zu einem Teilchen, welches sich vorwärts in der Zeit bewegt, aber eine umgepolte Ladung aufweist. Teilchen, die bis auf das Vorzeichen der Ladung ihrem Gegenstück wie ein Spiegelbild gleichen, nennt man **Antiteilchen** (*antiparticle*).

Die Vernichtung (Annihilation) von Teilchen wird ausgelöst, wenn Teilchen mit Antiteilchen zusammenstoßen. Dabei wird Materie in Energie umgewandelt und meist werden zwei Photonen mit einer für diesen Vorgang typischen Energie emittiert.

Antimaterie: Aus negativen Protonen (Antiprotonen) und positiven Elektronen (Positronen) konnten im Experiment Antiwasserstoffatome hergestellt und nachgewiesen werden. Die Lagerung von Antimaterie ist kaum möglich, da bei Existenz von Materie – wie in unserem Universum – sofort ein Zusammenstoß Antimaterie-Materie zur Vernichtung führt.

Abb. 33.1 ***Bahnspur eines Positrons*** *(erste Fotografie des Entdeckers Anderson) Die Spur der Bahn ist im Magnetfeld gekrümmt. Nach dem Durchdringen einer 6 mm dicken Bleiplatte nimmt die Krümmung zu. Ursache ist die nach der Platte geringere Geschwindigkeit.*

Beispiel 2.8

Elektron-Positron-Produktion

Ein Röntgenphoton mit einer Wellenlänge von 0,5 pm trifft auf einen Atomkern. Ist es möglich, dass ein Elektron-Positron-Paar erzeugt wird?

Die Energie des Photons beträgt:

$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{5 \cdot 10^{-13}\ \text{m}} \approx 4 \cdot 10^{-13}\ \text{J} = \mathbf{2{,}5\ MeV}$$ [2]

Für die Paarerzeugung muss mindestens das doppelte Energieäquivalent der Ruhemasse des Elektrons erzeugt werden:

$$E_{Paar} = 2 \cdot m_e c_0^2 = 2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 9\ 10^{16}\ \text{m}^2/\text{s}^2 = 1{,}64 \cdot 10^{-13}\ \text{J} \approx \mathbf{1\ MeV}$$

Da die Energie des Röntgenphotons ausreicht ist es möglich, dass ein Elektron-Positron-Paar erzeugt wird. Die überschüssige Energie erhält das Materie-Antimateriepaar als kinetische Energie.

Bei einer Paarvernichtung (**Annihilation**) wird die Energie von etwa 1MeV wieder als Strahlungsenergie frei.

Abb. 33.2 *Die beiden Spiralen sind die Spuren eines Elektrons und eines Positrons. Sie wurden durch ein von links kommendes (nicht dargestelltes) Photon erzeugt. Die blaue Spur, die an derselben Stelle wie die Spiralen beginnt, gehört zu einem Atom, das von diesem Photon angestoßen wurde. Ein Magnetfeld bewirkt, dass die Bahnen der geladenen Teilchen gekrümmt sind.*

Nach DIRACS Meinung enthielt seine Theorie noch Fehler – schließlich gab es ja keine „positiven" Elektronen. Im Jahr 1932 entdeckte der Physiker Carl Anderson das **Positron** in der kosmischen Strahlung. Es ist ein elektrisch positiv geladenes Teilchen, das sonst alle Eigenschaften des Elektrons besitzt. Dirac meinte daraufhin lapidar: „*Die Gleichung war schlauer als ich.*" Das Positron war das erste bekannte Antiteilchen, viele weitere wurden in den darauf folgenden Jahren entdeckt.

Merk & Würdig

- Zu jedem Teilchen gibt es ein **Antiteilchen**. Dieses hat dieselbe Masse und entgegengesetzt gleiche Ladung.
- Alle Naturvorgänge sind auch mit den entsprechenden Antiteilchen möglich. Gravitation wirkt (vermutlich) in gleicher Weise auf Materie wie auch auf Antimaterie.

Abb. 33.3 *Professor DIRAC. Im Hintergrund sind Skizzen erkennbar, die Kräfte zwischen Wasserstoffatomen beschreiben.*

[1] PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC, britischer Physiker, (1902 Bristol – 1984 Florida). Dirac studierte an den Universitäten Bristol und Cambridge. Er gehörte zu den bedeutendsten theoretischen Physikern des 20. Jahrhunderts. 1933 erhielt er den Nobelpreis für Physik zusammen mit ERWIN SCHRÖDINGER.

[2] Zur Einheit „eV" siehe **Seite 44**.

2.3.2 Wie schwer ist ein Photon? *(what's the mass of a photon?)*

Im Folgenden geht es um die sehr nahe "Verwandtschaft" zwischen Impuls, Energie und Masse.

Abb. 34.1 *Relativistischer Energiesatz*

Die „ImpEnergie" (*the "momenergy"*)

Der relativistische Energiesatz

Zu einer faszinierenden Formel führt eine kleine Rechnung mit der relativistischen **Gesamtenergie** von Seite 31:

$$mc_0^2 = \frac{m_0 \cdot c_0^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}$$

Löst man den Wurzelausdruck auf ergibt sich:

$$\mathbf{m^2 \cdot c_0^4 = m_0^2 \cdot c_0^4 + m^2 \cdot v^2 \cdot c_0^2}$$

Setzt man E für die Gesamtenergie und den Impuls $p = m \cdot v$ ein ergibt sich:

$$\mathbf{E^2 = m_0^2 \cdot c_0^4 + p^2 c_0^2}$$ **(Relativistischer Energiesatz)**

Energie, Impuls- und Massenanteil können als Seiten eines rechtwinkeligen Dreiecks aufgefasst werden **(Abb. 34.1)**.
Der Energiesatz präsentiert das nahe „Verwandtschaftsverhältnis" zwischen den Erhaltungsgrößen Energie, Masse und Impuls!

Masse eines masselosen Teilchens *(mass of a massless particle)*

Das **Photon** hat keine Ruhemasse ($m_0 = 0$)! Das rechtwinkelige Dreieck **(Abb. 34.1)** reduziert sich auf zwei Seiten und es ergibt sich:

$$E = p \cdot c_0$$

Mit den Beziehungen $E = h \cdot f$ und $c_0 = \lambda \cdot f$ erhält man für den **Impuls (momentum)**: $\boldsymbol{p = h/\lambda}$

Obwohl das Photon keine Ruhemasse hat, besitzt es einen Impuls!

Es ist üblich, dem Photon eine Masse zuzuschreiben, die sogenannte äquivalente **relativistische Masse** (*relativistic mass*), oder kurz das **Massenäquivalent** des Photons:

$$\mathbf{m = \frac{E}{c_0^2} = \frac{hf}{c_0^2} = \frac{p}{c_0}}$$

Merk & Würdig

Relativistischer Energiesatz:

$$\mathbf{E^2 = m_0^2 \cdot c_0^4 + p^2 c_0^2}$$

Impuls eines Photons:

$$\mathbf{p = h/\lambda}$$

Massenäquivalent des Photons:

$$\mathbf{m = \frac{E}{c_0^2} = \frac{p}{c_0}}$$

Die Ruhemasse des Photons ist 0!

λ … Wellenlänge; $[\lambda] = m$
p … Impuls; $[p] = kgm/s$
E … Gesamtenergie; $[E] = J$

Energieeinheit Elektronenvolt:

$1 eV \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19} J$

m … Masse; $[m] = kg$
c_0 … Lichtgeschwindigkeit; $[c_0] = m/s$
h … Plank'sches Wirkungsquantum; $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Js

Übungen

Anhand der folgenden Übungen kannst du im Zusammenhang mit bewegten Teilchen deren Masse, Energie und Impuls errechnen.

Ü 2.17 Welcher Energie entspricht 1 kg Ruhemasse?

Ü 2.18 Ein voll geladener Akku eines Kraftfahrzeugs hat bei einer Spannung von 12 V eine Kapazität von 35 Ah. Um wie viel ändert sich die Masse bei vollständiger Entladung auf Grund der Energie-Massen-Äquivalenz? Vergleiche das Ergebnis mit **Beispiel 2.6**.

Tipp: Der Energieinhalt des Akkus berechnet sich aus Kapazität mal Spannung. Beachte, dass die Kapazität nicht in SI-Einheit angegeben ist!

Ü 2.19 **Sonne:** Die Leuchtkraft (Strahlungsleistung) unserer Sonne beträgt $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W. Als Energiequelle dient die Kernfusion **(Abb. 34.2)**. Wie viel Masse gehen der Sonne pro Tag auf Grund des Massendefekts verloren?

Ü 2.20 Berechne Impuls und „Masse" eines Photons im Bereich des sichtbaren Lichts (500 nm).

Ü 2.21 *In a **colliding beam experiment**, an electron with total energy 4.7 GeV collides with a positron of the same total energy. Their annihilation produces two photons with the same energy. What is its frequency?*

Ü 2.22 *Calculate the momentum and the relativistic mass of a photon (green light; 570 nm wavelength).*

Abb. 34.2 *Bei der **Kernfusion** sind die Ausgangsprodukte schwerer als das Endprodukt. Die Differenz wird als Energie freigesetzt.*

2.4 Raum-Zeit-Diagramme *(space-time diagrams)*

Im **Kapitel 2.1.4** wurde festgehalten, dass Raum und Zeit miteinander zur Raum-Zeit „verwoben" sind: Ist die Zeit gedehnt, dann ist der Raum gestaucht.
Zur Veranschaulichung von Vorgängen in der Raum-Zeit dienen Raum-Zeit-Diagramme. Um mit zwei Dimensionen auszukommen, beschränkt man sich auf bloß eine Raumachse und die Zeitachse **(Abb. 35.1)**.

- **Skalierung** *(scaling)*:
  In Raum-Zeit-Diagrammen (Minkowski[1)]-Diagrammen) wird die Zeit mit der Lichtgeschwindigkeit multipliziert. Somit wird daraus eine Abstandskoordinate: Sie entspricht der Strecke, die Licht in der Zeit t zurücklegt. Die **Maßeinheiten** der Achsen werden meist so gewählt, dass eine Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit in x-Richtung der 45°-Geraden entspricht.
- **Weltlinie** *(worldline)*:
  Zeichnet man den Ort eines Körpers Punkt für Punkt in das Diagramm ein, dann erhält man die sogenannte Weltlinie. Ein Körper mit **konstanter** Geschwindigkeit hat eine Gerade als Weltlinie. Sie muss steiler sein als die von Licht. Jedem Raumzeitpunkt einer Weltlinie entspricht auch ein (vierdimensionaler) Weltvektor $\vec{R}$ mit einer imaginären Zeitkoordinate:

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \\ \mathbf{jct} \end{pmatrix}$$

- **Der Lichtkegel** *(light cone)*:
  Auch mit drei Koordinaten lässt sich die Raum-Zeit eines Minkowski-Raums veranschaulichen. Angenommen, „Ich" stehe mit einer Lampe im Ursprung und schaue in den „Sternenhimmel". Lässt man nun eine Raum-Koordinate weg, dann können Bewegungen in der zeitlichen Dimension und in der x-y-Ebene veranschaulicht werden **(Abb 35.2).**
  – Die Weltlinien der Photonen des Lichts der Lampe bilden einen Kegelmantel, den **Lichtkegel**, der nach oben offen ist. Das Licht breitet sich in die Zukunft aus. Jedes Ereignis P innerhalb des oberen Kegelmantels könnte vom Ereignis „Ich" im Ursprung erreicht werden. Dabei würde die Lichtgeschwindigkeit nicht überschritten werden. Man nennt diesen Abschnitt der Raum-Zeit-Welt die **absolute Zukunft** (vom Ereignis „Ich").
  – Analog stellt die untere Hälfte des Lichtkegels die **absolute Vergangenheit** dar. Betrachte „Ich" das Licht der Sterne, dann kommt dieses aus der Vergangenheit. „Ich" schaue in diese absolute Vergangenheit.
  – Ereignisse dieser Vergangenheit können das „Ich" beeinflussen, Kausalzusammenhänge sind möglich. Ereignisse außerhalb des Vergangenheitskegels können „mich" (derzeit) nicht beeinflussen.

Abb. 35.1 ***Raum-Zeit-Diagramm:*** *Die Weltlinien zweier Photonen sind rot eingezeichnet; ein Photon „läuft" nach links, das andere nach rechts.*

Abb. 35.2 *„Mein" Lichtkegel*

Abb. 35.3 *H. MINKOWSKI*

[1)] HERMANN MINKOWSKI (1864 Alexotas bei Kowno – 1909 Göttingen), deutscher Mathematiker. Er lehrte in Königsberg, Zürich und Göttingen. Zur Darstellung physikalischer Vorgänge in der Einstein'schen Relativitätstheorie führte er den **4-dimensionalen „Minkowski-Raum"** ein. Dieser enthält drei reelle Ortskoordinaten und eine imaginäre Zeitkoordinate jct.

2.5 Raum-Zeit und Gravitation *(space-time and gravitation)*

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen und einige Folgerungen der **Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)** vorgestellt.

Die Newton´sche Vorstellung von Gravitation ist mit den Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie nicht mehr vereinbar. Die Allgemeine Relativitätstheorie verknüpft die Einstein´schen Prinzipien auch mit der **Gravitation**.

Streng genommen treten in einer materiellen Welt immer Gravitationskräfte auf. In der SRT wurden Einflüsse durch Gravitationsfelder allerdings vernachlässigt. Es zeigt sich, dass dieser Kompromiss für viele Anwendungen vertretbar ist. Die Auswirkungen der Gravitation im Rahmen der ART werden nur bei großen Massen (Planeten, Sternen, Galaxien) deutlich.

Abb. 36.1

2.5.1 Gravitation und Trägheit *(space-time and gravitation)*

In der Newton´schen Physik treten zwei an sich unterschiedliche Phänomene auf, die mit der Eigenschaft der Masse verknüpft sind:

- Die **Trägheit**: Sie macht sich als Widerstand jeder Masse gegenüber einer Beschleunigung bemerkbar. Man spricht auch von **träger Masse**: Träge Masse widersetzt sich nach dem dynamischen Grundgesetz mit der Trägheitskraft $F = m \cdot a$ jeder Beschleunigung.
- Die **Gewichtskraft**: Sie äußert sich durch eine Kraft auf Objekte in einem **Gravitationsfeld**. Hier wird **schwere Masse** in der Newton´schen Gravitationsformel $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ mit einer anziehenden Kraft verknüpft.

Es zeigt sich in vielen Experimenten, dass eine Abweichung zwischen träger und schwerer Masse sehr klein und vermutlich nur auf die Messungenauigkeit zurückzuführen ist. Einstein hat sich dabei auf ein Experiment berufen, das Lorand **Eötvös** mit einer Drehwaage durchgeführt hat.

Die Grundlage der ART ist nun Einsteins **Äquivalenzprinzip**: Es setzt die beiden Aspekte der Masse – die **Träge und die Schwere** – gleich.

Experiment

Gedankenexperiment: Einstein „entschwebt“

„Ich saß auf meinem Stuhl im Patentamt in Bern. Plötzlich hatte ich einen Einfall: Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, wird sie ihr eigenes Gewicht nicht spüren. Mir ging ein Licht auf. Dieser einfache Gedanke beeindruckte mich nachhaltig. Die Begeisterung, die ich da empfand, trieb mich dann zur Gravitationstheorie.“
ALBERT EINSTEIN

Abb. 36.2

Angenommen, Albert befindet sich in einem nach außen abgeschlossenes System („black box“). Er ist mit allen erdenklichen Experimenten und Messgeräten ausgestattet. Im Inneren dieses Systems kann durch Messungen nicht festgestellt werden

- **ob das System** im gravitationsfreien Raum **schwebt** (Abb. 36.2 links) oder
- ob sich das System in einem Gravitationsfeld im **freien Fall** (Abb. 36.2 rechts) befindet.

Experiment

Gedankenexperiment: Alberts Flug ins All

„Kein wie auch immer geartetes (lokales) Experiment kann zwischen Trägheit und Schwere unterscheiden."
ALBERT EINSTEIN

Abb. 37.1

Angenommen, Albert befindet sich in einem nach außen abgeschlossenes System („black box"). Albert führt nun verschiedenartigste Messungen und Experimente aus, soviel er sich nur ausdenken kann. Im Inneren dieser „black box" kann durch Messungen nicht festgestellt werden, ob das System

- in einem Gravitationsfeld ist und z. B. auf einem Planeten **ruht** (**Abb. 37.1** links), oder
- im gravitationsfreien Raum **beschleunigt** wird (**Abb. 37.1** rechts).

Vereinheitlichung von Gravitation und Trägheit

Einstein sah die Identität zwischen träger und schwerer Masse nicht als etwas Nebensächliches an, sondern als eine tiefliegende universelle Eigenschaft der Natur. Einstein erweiterte das Äquivalenzprinzip auf die gesamte Physik. Im Gedankenexperiment **(Abb. 37.1)** wird dies formuliert: **Jedes beliebige** Experiment läuft gleich ab, gleichgültig ob in der beschleunigten Rakete oder im Labor auf der Erde. Gravitation und Trägheit sind ununterscheidbar (äquivalent). Das gilt auch für Licht.

Merk & Würdig

Äquivalenzprinzipien:

- Schwere und träge Masse sind gleich groß, sie sind prinzipiell ununterscheidbar.
- Ein homogenes Gravitationsfeld ist einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem vollkommen äquivalent.

2.5.2 Photonen im freien Fall *(free-falling photons)*

Eine Folge der **SRT** ist, dass alle Beiträge zur **Masse und Energie** (thermische -, elektrische -, Kernenergie, etc.) **äquivalent** zu behandeln sind. Baut man diesen Gedanken im Rahmen der ART aus, dann ist Energie (und somit auch Licht) dem Fallgesetz bzw. der Trägheit ausgeliefert!

Licht geht krumme Wege *(light round the bend)*

Eine überprüfbare Schlussfolgerung der ART war die **Ablenkung von Licht im Gravitationsfeld**. Der Effekt ist allerdings beim Erdgravitationsfeld extrem klein. Lichtablenkung kann auch aus der Sicht eines beschleunigten Bezugssystems, wie die folgende Abbildung zeigt, verstanden werden:

Abb. 37.3 *Aus der Sicht Bertas ist der Lichtweg in der* ***beschleunigten*** *Rakete* ***gekrümmt****. Beschleunigte und gravitative Systeme sind, auch was die Lichtablenkung betrifft, vollkommen äquivalent!*

Abb. 37.2 ***Lichtablenkung:*** *Lichtstrahlen, die von einem Fixstern kommen und knapp an der Sonne vorbeistreichen, werden im Gravitationsfeld abgelenkt.*
Dies wurde experimentell nachgewiesen: Die Expedition zur Beobachtung der ***Sonnenfinsternis*** *im Jahr 1919 war erfolgreich und die Vorhersagen Einsteins zur Lichtkrümmung konnten dabei bestätigt werden. Dies brachte Einstein in die Schlagzeilen ab diesem Jahr war Einstein weltbekannt.*

Abb. 38.2 *Robert Pound (im Bild am Fuß eines 20 m hohen Turms) konnte 1959 die* ***Rotverschiebung*** *messen, die durch das Gravitationsfeld der Erde verursacht wird.*

„Ein Photon wird rot"

Gravitative Rotverschiebung *(gravitational red shift)*

A) Ein Photon „fällt auf die Erde". Nach den Einstein´schen Prinzipien muss das Photon Energie dazugewinnen.

B) Wir richten einen Lichtstrahl nach oben **(Abb. 38.1)**, die Photonen müssen nun Hubarbeit im Gravitationsfeld verrichten.

Abb. 38.1 *Frequenzverschiebung im Gravitationsfeld*

In beiden Fällen dürfen die Lichtteilchen dabei aber ihre Lichtgeschwindigkeit nicht verändern! Die Photonen „reagieren", indem sie ihre Frequenz verändern. (Zur Erinnerung: $E = h \cdot f$. Die Energie des Photons ist über die Planckkonstante mit der Frequenz gekoppelt.)

A) Beim Fallen im Gravitationsfeld gewinnt das Photon Energie, es wird kurzwellig (**gravitative Blauverschiebung**).

B) Beim Aufsteigen verliert das Photon Energie, es wird langwellig (**gravitative Rotverschiebung**).

Der Effekt ist beim Erdgravitationsfeld sehr klein, aber messbar **(Abb. 38.2)**. Bei astronomischen Beobachtungen und Messungen ist die gravitative Rotverschiebung aber von großer Bedeutung. So kann aus der Rotverschiebung von Spektrallinien ferner Sterne auf deren Masse geschlossen werden.

„Im Himmel schlagen die Herzen schneller"

Gravitative Zeitdehnung *(gravitational time dilation)*

In direktem Zusammenhang mit der Frequenzverschiebung steht der Gang von Uhren. Verwendet man einen Laserstrahl für die Zeitmessung, dann kann seine Periodendauer als Zeitmaß dienen.

Experiment

Gedankenexperiment

Zwei baugleiche Uhren A und B, die die Periodendauer eines Laserstrahls als Zeitmaß verwenden, werden in unterschiedlicher Höhe positioniert.

Richtet man den Strahl der Uhr B, so wie in **Abb. 38.3** aus, dann erhöht sich beim „Herunterfallen" die Frequenz (Blauverschiebung). Die Periodendauer in Erdnähe wird kleiner.

Beim Uhrenvergleich (er muss am gleichen Ort stattfinden, **Kapitel 2.1**) bemerkt Berta: Die Periodendauer ihrer Uhr A ist größer als die Periodendauer des Signals (Uhr B'). Bertas Uhr A geht langsamer als die Uhr in größerer Höhe (**gravitative Zeitdilatation**).

Abb. 38.3

Der Effekt der Zeitdilatation tritt ganz allgemein auf: Die Zeit in der Nähe großer Massen verstreicht langsamer.[1)]

Der Effekt ist für unser alltägliches Leben unbedeutend: Wer am Berg wohnt altert in seinem ganzen Leben nicht einmal eine Millisekunde weniger als jemand, der im Tal wohnt. Willst du aber nicht mit einer altmodischen, unbequemen Landkarte reisen, sondern auf dein Navigationsgerät vertrauen, dann hast du auch im Alltag mit der Zeitveränderung zu tun:

Satellitennavigation *(GPS; Global Positioning System)* benützt Signale von Satelliten. Deren „Herzschlag" beruht auf sehr genauen Atomuhren. Über Laufzeitmessungen zwischen deinem GPS-Gerät und den Satelliten berechnet das Gerät deine Bodenkoordinaten. Ohne relativistische Korrekturen wäre dein Gerät viel zu ungenau.

Abb. 39.1 ***GPS-Satelliten*** *des Systems Galileo. Es wird von der ESA (European Space Agency) ab Juli 2013 (erster Test) betrieben.*

2.5.3 Gekrümmter Raum *(curved space)*

Masse kürzt Längen *(mass makes lengths shorter)*

Gravitation hat auch Einfluss auf Maßstäbe. Die gravitative Zeitdilatation geht unmittelbar einher mit einer Längenkorrektur.

Angenommen wir messen die Lichtgeschwindigkeit c. Sie ist in allen Systemen gleich. Da aber beispielsweise die Zeit in der Nähe einer Masse langsamer verläuft und wir trotzdem die Lichtgeschwindigkeit messen, muss im selben Ausmaß die Länge kürzer sein (Vergleiche mit **Kapitel 2.1.4**).

Abb. 39.2 *Zweidimensionale Vorstellung einer Raumzeit-Krümmung um eine große Masse.*

Masse krümmt die Raumzeit[2)] *(mass makes spacetime curved)*

Das **Schrumpfen** von Maßstäben in der Nähe großer Massen kann vollkommen gleichwertig auch durch die Einführung eines **gekrümmten Raums** beschrieben werden. In **Abb. 39.4** ist erkennbar, dass für das Ausmessen eines Durchmessers von Körpern mit großer Masse mehr Maßstäbe notwendig sind als bei kleinen Massen. Ursache ist die gravitative Längenkontraktion bzw. eine Raumkrümmung.

Raumkrümmung kann man sich dreidimensional in etwa so vorstellen: In einer Kugel mit großer Masse ist bei gleichem Durchmesser mehr Raum (Volumen) enthalten als bei einer Kugel mit geringer Masse.

Abb. 39.3

Abb. 39.4 ***Links:*** *In der Nähe der Masse wird der Maßstab verkürzt. Für den Durchmesser des Kreises sind daher mehr Maßstäbe nötig.*
Rechts: *Derselbe Effekt kann auch durch die Einführung eines gekrümmten Raums beschrieben werden. Für den Durchmesser sind auch auf diese Weise mehr rot-weiß-rot angedeutete Maßstäbe notwendig.*

> „Früher hat man geglaubt, wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig; nach der Relativitätstheorie verschwindet aber Zeit und Raum mit den Dingen." ALBERT EINSTEIN

1) **Gravitation und Radioaktivität:** Man bringt von zwei exakt gleich schweren radioaktiven Präparaten mit gleicher Halbwertszeit eines in eine Erdumlaufbahn. Wird das Präparat nach einiger Zeit wieder am Erdboden mit seinem „Zwilling" verglichen, dann hat es zwar noch dieselbe Halbwertszeit, aber seine Aktivität und Masse haben abgenommen. Es haben während des Ausflugs aufgrund des unterschiedlichen Zeitablaufs mehr Zerfälle stattgefunden. Die „radioaktive Uhr" ist aus „der Sicht" der Erde schneller gelaufen. Das zurückgekehrte Präparat hat weniger Gesamtenergie als das Zwillingsstück. Die „verlorene" Energie steckt in der zuvor abgegebenen radioaktiven Strahlung.

2) Da Raum und Zeit so stark miteinander verwoben sind, wird ab hier „Raumzeit" ohne Bindestrich geschrieben.

> (…) Spacetime grips mass,
> Telling it how to move;
> And mass grips spacetime,
> Telling it how to curve. (…)
> J. ARCHIBALD WHEELER

Abb. 40.1 *Einstein erklärt den mathematischen Formalismus der Raumkrümmung.*

Einstein'sche Feldgleichungen *(Einstein's field equations)*

Die Einstein'schen Feldgleichungen legen fest, wie stark Materie **(Masse + Energie)** die Raumzeit-Geometrie krümmt. Gleichzeitig „sagt" aber auch die Raumzeit-Geometrie der Materie, wie sich ein Planet, eine Galaxie oder ein Lichtstrahl bewegen soll.

Der gekrümmte Lichtstrahl um einen Stern ist Ausdruck dieser Raumkrümmung in der Nähe einer schweren Masse. Der Lichtstrahl „wählt" dabei den **kürzesten Weg**.

Es ist eigentlich nicht möglich, sich eine 4-dimensionale gekrümmte Raumzeit vorzustellen. Auch die mathematische Beschreibung dieses Raums war für Einstein nicht einfach. Die Arbeit an der ART war für Einstein, wie er selbst sagte, Schwerarbeit. Von der ersten Formulierung des Äquivalenzprinzips bis zur Veröffentlichung der „Einstein´schen Feldgleichungen" 1915/1916 benötigte Einstein fast zehn Jahre.

Merk & Würdig

- Beim Aufsteigen in einem Schwerefeld verliert das Photon Energie, es wird langwellig (gravitative Rotverschiebung). Beim Absinken erfahren Photonen eine Blauverschiebung.
- In der Nähe einer (großen) Masse
  - schrumpfen Maßstäbe und
  - gehen Uhren langsamer.
- Materie (Masse + Energie) krümmt die Raumzeit. Gleichzeitig „sagt" die Raumzeit-Geometrie der Materie, wie sich ein Planet, eine Galaxie oder ein Lichtstrahl bewegen soll.

2.5.4 Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie
(effects of the general theory of relativity)

Periheldrehung des Merkur *(perihelion shift of mercury)*

Nach der Gravitationstheorie von Newton bewegen sich die einzelnen Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne. Der sonnennächste Punkt dieser Ellipsen heißt Perihel. Die beobachtete Lage des **Perihel** vom Merkur weicht von der mit den Mitteln der klassischen Physik vorhergesagten Position leicht ab.

Mit der ART konnte Einstein die beobachtete Periheldrehung erklären und berechnen. Für Einstein war dies der erste Test seiner ART: Test bestanden!

Abb. 40.2 ***Periheldrehung des Merkur.*** *Bei der Annäherung des Planeten an die Sonne macht sich die Raumkrümmung bemerkbar – der Perihel wird etwas nach vor gedreht.*

Gravitationswellen *(gravitational waves)*

Einstein setzt voraus, dass sich auch Gravitation mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Bei starker zeitlicher Änderung des Gravitationsfeldes, beispielsweise bei einer Sternexplosion (Supernova), müssten Wellen ähnlich wie elektromagnetische Wellen entstehen. Derzeit wird weltweit an verschiedenen Experimenten gearbeitet, um Gravitationswellen „einfangen" zu können.

Abb. 40.3 *Ergebnis der Simulationsrechnung einer* ***Gravitationswelle*** *eines Doppelsternsystems. Die hohe Rotationsgeschwindigkeit der zueinander sehr nahen Sterne erzeugt Gravitationsschwankungen. Diese breiten sich im Raum aus. Gravitationswellen konnten bis jetzt nur indirekt nachgewiesen werden.*

Gravitationslinsen *(gravitational lenses)*

Mit Hilfe von Glaslinsen kann die Ausbreitung von Lichtstrahlen verändert werden. Ganz ähnlich funktioniert eine massive Masseansammlung. Liegt sie im Bereich der Sichtlinie zwischen Beobachter und einer Lichtquelle, dann wirkt sie wie eine Linse. Sie wird als **Gravitationslinse** bezeichnet. Die Brechung ist umso stärker, je größer die Masse des Himmelsobjekts ist. Einzelne Sterne führen kaum zu merkbaren Linseneffekten. 100 Milliarden Sterne in einer Galaxie (und ihre dunkle Materie) oder auch Ansammlungen mehrerer Galaxien ermöglichen eine kollektive Lichtablenkung **(Abb. 41.1)**.

Gravitationslinsen bieten die Möglichkeit, extrem weit entfernte Objekte zu beobachten. Zusätzlich kann man über den Effekt auch etwas über die Linse selbst erfahren, und damit über die Materieverteilungen im Universum.

Abb. 41.1 *Die Wirkung einer* ***Gravitationslinse*** *auf das Licht ferner Galaxien ist an den ringförmig angeordneten, verzerrten Galaxien (Pfeil) erkennbar.*

Schwarze Löcher *(black holes)*

Die wohl spektakulärsten Objekte im All sind „Schwarze Löcher"[1]. Ein Schwarzes Loch ist extrem stark gekrümmte Raumzeit. Die Krümmung ist so stark, dass innerhalb eines bestimmten **Ereignishorizonts**[2] nicht einmal Licht entweichen kann. Eine direkte Beobachtung von Schwarzen Löchern ist, da sie selbst keine Strahlung abgeben, nicht möglich. Indirekt können sich Schwarze Löcher aber doch bemerkbar machen: Durch ihre starke Gravitation wirken sie auf andere sichtbare Himmelskörper. Deren Bewegung lässt Rückschlüsse zu, die auf ein mögliches sehr massereiches Objekt im Nahbereich schließen lassen. Auch die entweichende Röntgenstrahlung außerhalb des Ereignishorizonts aus Regionen, in denen aktive Schwarze Löcher Materie „ansaugen", kann beobachtet werden.

Man vermutet, dass jede Spiralgalaxie, auch unsere Milchstraße, in ihrem Zentrum ein supermassives Schwarzes Loch mit der Masse von mehreren Milliarden Sonnenmassen hat.

Übungen

Wenn du alles beantwortest, dann kannst du im Zusammenhang mit der Raumzeit naturwissenschaftlichen Hypothesen auf ihre Glaubwürdigkeit überprüfen und naturwissenschaftliche Fragestellungen analysieren.

Ü 2.23 **a)** Raum-Zeit-Diagramme
- ☐ sind so skaliert, dass die Bewegung eines Photons auf der x-Achse verläuft.
- ☐ haben als lotrechte Achse die komplexe Raumzeit aufgetragen.
- ☐ veranschaulichen Weltlinien.

b) Lichtkegel
- ☐ trennen Vergangenheit und Zukunft.
- ☐ veranschaulichen die Ausbreitung des Lichts in der mehrdimensionalen Raumzeit.
- ☐ sind 4-dimensional.

c) Die ART
- ☐ hat etwas mit Gravitation zu tun.
- ☐ hat etwas mit Kunst zu tun.
- ☐ beschäftigt sich mit der Schwerebeschleunigung zwischen Elementarteilchen.

d) Welchem Satz kannst du ganz zustimmen?
- ☐ Die gravitative Zeitdilatation lässt das Herz in der Nähe großer Massen langsamer schlagen.
- ☐ In frei schwebenden Laborsystemen laufen Experimente der Elektrodynamik anders ab als im freien Fall.
- ☐ Beim Empfang von Signalen aus dem Weltall ist gravitative Blauverschiebung immer vorhanden, allerdings ist der Effekt sehr klein.

Ü 2.24 Beschaffe dir Informationen über das Experiment von Lorant Eötvös. Beantworte danach folgende Fragen:

a) Welches Prinzip von Einstein kann damit experimentell bestätigt werden?

b) Welche Art von Pendel wird dabei verwendet?

[1] Den Namen *„black hole"* hat dieser Stern von dem sehr kunstsinnigen und phantasievollen Physiker J. ARCHIBALD WHEELER erhalten. Von ihm stammt auch das Zitat auf Seite 40, das die ART zusammenfasst.

[2] Der **Ereignishorizont** ist bei nicht rotierenden Schwarzen Löchern eine Kugeloberfläche. Ihren Radius nennt man „Schwarzschildradius" (nach dem deutschen Astrophysiker KARL SCHWARZSCHILD). Schwarzschild hat 1916 (kurz vor seinem Tod) als erster eine Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen ermittelt.

3 Grundlagen der Quantenmechanik

In diesem Kapitel geht es um

- Lichtquanten
- den photoelektrischen Effekt
- den Compton-Effekt
- Elektronenwellen und Elektronenmikroskop
- die Unschärferelation
- die Wellengleichung von Schrödinger
- den Tunneleffekt
- Vakuumenergie
- virtuelle Teilchen

3.1 Die UV-Katastrophe und ihre Folgen

(the ultraviolet catastrophe and its consequences)

Am Ende des 19. Jh. standen die Physiker vor einem großen Rätsel. Sie untersuchten das kontinuierliche Spektrum der Strahlung eines heißen Körpers. Die Messung ergab, dass die Strahldichte für niedere Wellenlängen im **UV-Bereich** gegen null abnahm **(Abb. 43.3)**. Mit den Theorien der klassischen Physik waren die Messungen aber nur bei sehr hohen Wellenlängen in Übereinstimmung zu bringen. Bei kleinen Wellenlängen ergaben diese Formeln, dass die Strahlungsenergie über alle Grenzen ansteigen sollte. Dies wird als **UV-Katastrophe** bezeichnet.

Abb. 43.1

Experiment

Temperaturstrahlung (Band 3, Kapitel 7)

Die Leuchtfarbe eines Wärmestrahlers hängt von seiner Temperatur ab. Misst man die Intensität des jeweiligen Wellenlängenbereichs bei bestimmten Temperaturen, erhält man eine **spektrale Verteilung**. Das Strahlungsmaximum einer Glühlampe liegt im wärmenden Infrarotbereich.

Abb. 43.2 *Das Experiment zeigt, dass bei einer Temperatur von ca. 500 °C Metall rot zu glühen beginnt und damit sichtbare Strahlung abgibt.*

Abb. 43.3 ***Links: Spektrale Verteilung*** *für verschiedene Temperaturen eines Strahlers.* ***Rechts:*** *Die klassischen Berechnungen zur Beschreibung der Spektralverteilung führen bei kurzen Wellenlängen zur sogenannten* ***UV-Katastrophe*** *(strichlierte Linie).*

Gequantelte Energie *(quantised energy)*

Im Dezember 1900 konnte Max Planck[1] das Problem lösen. Der falsche (klassische) Formelzusammenhang beruhte auf der Vorstellung der Thermodynamik, dass die Oszillatoren mit jeder beliebigen Frequenz schwingen können. Planck nahm aber nun an, dass die Oszillatoren (die an das Atom gebundene Elektronen) eher so wie gespannte Saiten eines Musikinstruments nur mit bestimmten Frequenzen schwingen können **(Abb. 44.1)**. Auch die Energiewerte E der Oszillatorschwingungen können nur bestimmte (diskrete), zu ihrer Frequenz f proportionale Werte annehmen:

$$E = h \cdot f$$

Die Abgabe von Strahlung ist nur in bestimmten Mengen möglich; diese Portionen nennt man Quanten.

Abb. 43.4 *MAX PLANCK*

[1] MAX PLANCK (1858 Kiel – 1947 Göttingen) deutscher Physiker. 1885 Professor in Kiel, danach in Berlin; Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Plancks Hauptarbeitsgebiet war die theoretische Thermodynamik. 1900 stellte er die Grundlagen zur Quantentheorie auf, wofür er 1918 den Nobelpreis erhielt. In seinem Privatleben musste Planck große Schicksalsschläge hinnehmen: Seine erste Frau starb zu einer Zeit, als noch alle vier Kinder in der Grundschule waren. Sein Sohn Karl wurde im 1. Weltkrieg tödlich verwundet. Die beiden Zwillingstöchter starben jeweils bei der Geburt ihres ersten Kindes. Sein zweiter Sohn Erwin wurde als Mitwisser des Attentats auf Hitler verhaftet und hingerichtet.

Merk & Würdig

Energiequanten

$$E = h \cdot f$$

E … Energie eines Quants; *[E] = J*
h … Planck´sches Wirkungsquantum ($h = 6{,}626\,069\,57 \cdot 10^{-34}$ Js)
f … Frequenz der Strahlung; *[f] = Hz*

Die **Einheit der Energie *E*** wird oft in **Elektronenvolt (eV)** angegeben:

$1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

Frequenz: nf, 4f, 3f, 2f, f
Energie: E_n, E_4, E_3, E_2, E_1, E_0
Energiedifferenz ΔE

Abb. 44.1 *Gespannte Saiten können nur mit bestimmten Frequenzen schwingen. Die Frequenzen und damit auch die Energien sind **quantisiert**.*

Abb. 44.2

„ … die Natur macht keine Sprünge!"

Die Einführung einer Naturkonstante h, des Planck'schen Wirkungsquantums, war eine revolutionäre Annahme. Sie widersprach der Grundüberzeugung der klassischen Physik, wonach „die Natur keine Sprünge macht". Selbst Planck betrachtete die Energiequantisierung als „vorläufig", als mathematische Hilfskonstruktion. Erst nach und nach wurde den Physikern klar, dass die Größe h nicht nur für das Strahlungsproblem von Bedeutung war …

3.2 Was sind Quanten? *(What are quanta?)*

Planck war sehr vorsichtig mit seiner Interpretation des Quantenverhaltens. Einstein war hier konsequenter. Im Jahr 1905 hat sich Einstein mit den Arbeiten von Planck beschäftigt und das Energiequant benutzt, um den Photoelektrischen Effekt zu beschreiben.

3.2.1 Photoelektrischer Effekt *(photoelectric effect)*[1]

Eine Zinkplatte wird negativ geladen **(Abb. 44.3)**. Beleuchtet man die Platte mit dem Licht einer (oder mehrerer) herkömmlicher Glühlampen, dann zeigt das Elektroskop keine Entladung an. Wählt man aber das Licht einer UV-Lichtquelle, so tritt eine Entladung der Platte ein.

Experiment

Photoelektrischer Effekt

negativ geladene Zinkplatte
UV-Lichtquelle
Elektroskop zeigt Entladung an
Von Licht aus der Photokathode abgelöste Elektronen = Photostrom
elektrisch geladene Photokathode
UV-Licht
Photostrom
Ringanode
U
nA

Abb. 44.3 ***Links:*** *Beleuchtet man die geladene Zinkplatte mit dem Licht einer UV-Lichtquelle, entlädt sich die Platte.*
Rechts: Messung der Energie *der ausgetretenen Elektronen: Die Zinkplatte wird mit Licht bekannter Frequenz bestrahlt. Dadurch werden Elektronen bestimmter kinetischer Energie aus der Photokathode ausgelöst. Legt man eine geeignete Gegenspannung U an die Elektroden, kann die Elektronenenergie bestimmt werden.*

[1] Der hier besprochene Effekt ist auch als **äußerer Photoeffekt** bekannt. Der **innere Photoeffekt** wird in Halbleitern festgestellt.

Interpretation des Photoeffekts

Huygens Ansatz funktioniert nicht:

Huygens hat Lichtwellen mit Wasserwellen verglichen: Die Zerstörungskraft einer „hohen" Wasserwelle ist größer als die vieler kleiner Wellen (mit hoher Frequenz). Huygens hätte erwartet, dass eine genügend hohe Lichtintensität die Elektronen dazu bringen würde, die Metalloberfläche zu verlassen.

Das Experiment mit der Zinkplatte zeigt aber, dass es nicht reicht, die Lichtintensität zu erhöhen, um die Platte zu entladen. Das Elektron „reagiert" erst auf Licht oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz.

Merk & Würdig

Einsteins Ansatz ist besser:

- Die Photonen haben (nach Max Planck) eine Energie:

  $\mathbf{E = h \cdot f}$

- Die Photonen haben einen Impuls:

  $\mathbf{p = h / \lambda}$

- Dieser Impuls ist bei UV-Licht groß genug, um die Elektronen aus der Zinkplatte herauszuschlagen.

Austrittsarbeit W_A *(work function)*

In **Abb. 45.2** gibt es einen Bereich, in dem die Geraden strichliert gezeichnet sind. Hier können keine Messwerte erfasst werden. Die Energie der Photonen reicht hier nicht, um Elektronen aus dem Metall „herauszuschlagen". W_A ist die Austrittsarbeit des Elektrons. Die Austrittsarbeit W_A hängt vom Metall der Platte ab!

Planckkonstante h *(Planck´s constant)*

Die Konstante h kann mit Hilfe des photoelektrischen Effekts gemessen werden **(Abb. 44.3** und **Beispiel 3. 1)**.

Abb. 45.1

Beispiel 3.1

Bestimmung der Planck-Konstanten (Wirkungsquantum h)

Aus dem Diagramm in **Abb. 45.2** soll die Steigung der linearen Funktionen gemessen werden.

Die Steigung k ist $\mathbf{k = \frac{\Delta E}{\Delta f}}$.

Um die beiden Differenzen zu ermitteln wählt man ein rechtwinkeliges Steigungsdreieck. Man erhält beispielsweise für Zink die Werte:

$\Delta E = 4{,}5$ eV und $\Delta f = 11 \cdot 10^{14}$ Hz.

Beachte, die Einheit eV muss in Joule umgewandelt werden:

$$k = \frac{\Delta E}{\Delta f} = \frac{4{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{11 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}} = \mathbf{6{,}6 \cdot 10^{-34}\ Js}$$

Dieser Wert entspricht in etwa dem **Planck'schen Wirkungsquantum h**.

Abb. 45.2 ***Energie-Frequenz-Diagramm*** *des Photoeffekts:*

Trägt man die gemessene kinetische Energie der Elektronen als Funktion der Frequenz des Lichts auf, erhält man lineare Kennlinien. Es ist bemerkenswert, dass der ***Anstieg*** *der Geraden für alle Materialien* ***gleich*** *ist.*

Übungen

Wenn du die Beispiele löst und die Fragen beantworten kannst, dann weißt du über Energiequanten Bescheid und du bist in der Lage naturwissenschaftliche Vorstellungen nach ihrer sachlichen Richtigkeit zu hinterfragen!

Ü 3.1 Welches Problem konnte mit den Mitteln der klassischen Physik Ende des 19. Jh. nicht gelöst werden?

- ☐ Theorien haben bei hohen Frequenzen der Strahlung eines Schwarzen Körpers viel zu hohe Intensität vorausgesagt.
- ☐ Theorien haben bei hohen Wellenlängen viel zu hohe Strahlungsintensitäten eines heißen Körpers vorausgesagt.
- ☐ Kontinuierliche Energieverteilungen der Oszillatorschwingungen haben zu falschen Voraussagen der Schwarzkörperstrahlung geführt.

Ü 3.2 **„Denk Positiv“:** Julia hat eine Idee. Sie will den Ablauf des Photoeffekts abändern und die Zinkplatte nicht negativ, sondern positiv aufladen und dann mit UV-Licht bestrahlen. Überlege: Wie wird Julias Experiment ablaufen?

Ü 3.3 Berta gesteht, dass sie den Cartoon in **Abb. 43.1** nicht ganz verstanden hat. Albert meint, wenn man eine Pointe erklärt, dann kann man nicht mehr lachen und will daher Berta nicht helfen. Erkläre den Cartoon in wenigen Sätzen.

Ü 3.4 **Austrittsarbeit: a)** Welche Energie (in Joule) **b)** welche Wellenlänge und **c)** welchen Impuls müssen die Photonen der auffallenden Lichtstrahlung mindestens aufweisen, damit mit Hilfe des Photoeffekts Elektronen aus einer Silberplatte (Ag) abgelöst werden können? Verwende dazu **Abb. 45.2**

Ü 3.5 *Photoelectric effect: Use caesium (Cs) in* **Abb. 45.2** *to do the following: Estimate a value for the Planck constant.*

> *“We find that the wave length of the scattered rays is what it should be …, just as one billiard ball bounces from another… we actually observe the recoiling billiard ball, or electron, from which the quantum has bounced, and we find that it moves just as it should if a quantum had bumped into it. …”*
> A. COMPTON, 1926

Der Compton-Effekt *(the Compton effect)*

Licht spielt Billard! *(Planck´s constant)*

Einen weiteren Hinweis auf den Teilchencharakter des Lichts bringt ein Effekt, der erstmals 1922 von Arthur Compton[1] bei einem Streuexperiment entdeckt wurde. Er beschoss einen Streukörper aus Graphit („Target“) mit Röntgenlicht und untersuchte die Wellenlänge.

Experiment

Compton-Effekt

Strahlenquelle für Röntgen- oder γ- Strahlung
γ
$\lambda < \lambda'$
Streukörper
θ
Szintillator
Röntgenphoton mit dem Impuls p_1
Photon mit größerer Wellenlänge mit dem Impuls p_2
freies Elektron
Elektron danach mit dem Impuls p_e

Abb. 46.1 *Compton stellte dabei fest, dass die Röntgen-Photonen an den schwach gebundenen Elektronen gestreut werden und dabei einen Teil ihrer Energie abgeben. Die gestreuten Photonen werden mit dem Szintillator gemessen. Sie haben eine kleinere Frequenz bzw. größere Wellenlänge, was sich mit der Wellentheorie von Licht nicht erklären lässt.*

[1] ARTHUR HOLLY COMPTON (1892 Wooster, Ohio – 1962 Berkeley), US-amerikanischer Physiker. Unter der Leitung von Fermi arbeitete er am Manhattan-Projekt zum Bau der Atombombe mit und leitete von 1942 bis 1945 die Herstellung von Plutonium. Für die Entdeckung des Compton-Effekts und seine Untersuchung der kosmischen Strahlen und der Spektren von Röntgenstrahlen teilte sich Compton mit dem britischen Physiker Charles Wilson 1927 den Nobelpreis für Physik.

Betrachtet man Röntgenlicht (und das Elektron) als Teilchen, dann liefern die entsprechenden Vektoren in **Tab 47.1** nach den Stoßgesetzen der Mechanik **(Band 1)** den Impulserhaltungssatz. Die Erhaltungssätze ergeben sich mit:

Vor dem Stoß		Nach dem Stoß
IES: $\vec{p}_1 + \vec{0}$	=	$\vec{p}_2 + \vec{p}_e$
EES: $p_1 c_0 + m c_0^2$	=	$p_2 c_0 + \sqrt{p_2 \cdot c_0^2 + m_0^2 \cdot c_0^4}$

Energie des Elektrons

Tab. 47.1

p1
p2
pe

Abb. 47.1

Hinweis: Hier haben sich die Ansätze für den relativistischen Impuls und die Energie bewährt, wie sie in **Kapitel 2.3.2** vorgestellt wurden:

$\mathbf{E_2 = m_0^2 \cdot c_0^4 + p^2 c_0^2}$ (Relativistischer Energiesatz)

$\mathbf{p = h/\lambda\, ;\, E = p \cdot c_0}$ (Impuls und Energie des Photons)

Das wesentliche Ergebnis des Experiments von Compton ist, dass die Erhaltungssätze auch im **atomaren Bereich** Gültigkeit haben.

Dies wird oftmals beobachtet, z. B.:
- Vorgänge beim Eindringen kosmischer Partikel in unsere Erdatmosphäre (Höhenstrahlung, **Kapitel 2.1.4**)
- Stöße zwischen Elementarteilchen in Beschleunigeranlagen **(Kapitel 5.4)**.

Abb. 47.2 *Compton mit einer Realisierung des Streuexperiments*

Was sind Quanten? *(what are quanta?)*

Albert Einstein konnte diese Frage im Verlauf seiner wissenschaftlichen Laufbahn nicht wirklich klären. Hätte sich Einstein nur mit Phänomenen und Erklärungen rund um den Photoeffekt beschäftigt, dann hätte er die Frage mit „Lichtquanten sind Teilchen!" beantwortet. Aber da gibt es noch eine Eigenschaft von Licht: Die **Interferenz**.

„Fünfzig Jahre intensiven Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage „Was sind Lichtquanten?" nicht näher gebracht. Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein, er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich."
ALBERT EINSTEIN, 1951

3.2.2 Quanteninterferenz *(quantum interference)*

Licht schillert!

Eine alltägliche Erfahrung – das Schillern einer DVD – ist **nicht** mit der Teilchenvorstellung beschreibbar. Mit der Wellentheorie des Lichts kann die Beugung von Licht**wellen** aber beschrieben werden. Auch Hell-Dunkelstreifen bei Beugungsexperimenten mit einfarbigem Licht, sind mit Hilfe der **Überlagerung** von **Wellen** erklärbar **(Abb. 48.1)**.

Folgende Stichworte werden in Band 3 behandelt:

- **Destruktive** Interferenz – Auslöschung
- **Konstruktive** Interferenz – Verstärkung

Abb. 47.3 *Schillernde* ***Interferenzmuster*** *eines Datenträgers*

Experiment

Doppelspaltexperiment

Durch die Interferenz am feinen Doppelspalt …

Schirm

destruktive Interferenz

… erscheint der Laserstrahl in viele Punkte aufgefächert.

Laserstrahl

konstruktive Interferenz

Abb. 48.1 ***Beugung des Laserstrahls am Doppelspalt.*** *Die Erklärung für das Beugungsbild gelingt mit Hilfe der Wellentheorie des Lichts. Die* ***Computersimulation*** *(rechts) zeigt: Durch Überlagerung der Wellen – Auslöschung und Verstärkung – erhält man ein periodisches Muster.*

„Im Verlauf des Jahres 1923 hatte ich unversehens die Idee, dass die Entdeckung von Einstein im Jahre 1905 verallgemeinert und ausgeweitet werden sollte auf alle materiellen Partikel insbesondere auf Elektronen." LOUIS DE BROGLIE, Paris 1924

Abb. 48.2 ***Beugungsmuster****, Beugung an einer dünnen Aluminiumfolie.*

Links*: mittels Röntgenstrahlen*

Rechts*: mit Elektronen gleicher Wellenlänge*

„Am Montag, Mittwoch und Freitag ist ein Quantenobjekt ein Teilchen, und am Dienstag, Donnerstag und Samstag ist es ein Objekt mit Welleneigenschaften, also eine Welle; am Sonntag, tja am Sonntag arbeitet kein Physiker!" W. BRAGG

Abb. 48.3 *DE BROGLIE*

Elektronenwellen *(wavy electrons)*

Haben auch Teilchen Wellencharakter?

Diese Frage stellte sich ein französischer Physiker, der ein kleines Privatlabor im Keller seines Familiensitzes betrieb: Louis de **Broglie**.

Die Hypothese von de Broglie lautet:

Wenn dem Licht Teilchen- und Welleneigenschaften zugeschrieben werden können, warum sollen dann nicht **Elektronen** (und anderen Teilchen) nicht auch Teilchen- und **Welleneigenschaften** zeigen.

De Broglie beschrieb mit denselben Zusammenhängen, die Einstein den Photonen zugeordnet hat, auch Elektronen. Setzt man die Gleichung für den klassischen Impuls $p = m \cdot v$ gleich $\mathbf{p = h/\lambda}$, erhält man die Wellenlänge für die zugehörige Materiewelle:

$$m \cdot v = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m \cdot v} \qquad \lambda \text{ … De Broglie-Wellenlänge}$$

De Broglies Hypothese wurde 1927 bei Experimenten mit Elektronenstrahlen nachgewiesen: Die Strahlen wurden auf Kristalle oder durch Folien gelenkt. Am Leuchtschirm entstand ein Interferenzmuster (das gleiche Muster, das bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlung gleicher Wellenlänge entsteht, **Abb. 48.2**).

Materiewellen: De Broglies[1)] Beziehung gilt für beliebige Materie. Da die berechnete Wellenlänge allerdings für makroskopische Objekte extrem klein ist, können Welleneigenschaften (z. B. Beugung) im Alltag nicht wahrgenommen werden **(Beispiel 3.2)**.

Aufgrund der kleinen Wellenlänge von Elementarteilchen ergeben sich aber ganz neue Möglichkeiten, mit solchen Teilchen die Welt des Kleinen zu erforschen. Beispiel einer ganz wichtigen technischen Anwendung ist das **Elektronenmikroskop** **(Seite 50)**.

EINSTEIN über de Broglie:
„… Er hat einen Zipfel des großen Schleiers gelüftet!"

1) LOUIS-VICTOR DUC DE BROGLIE (1892 Dieppe – 1987 Louveciennes bei Paris), französischer Physiker. Der aus adeligem Haus stammende Louis studierte zuerst Geschichte. Unter dem Einfluss seines Bruders Maurice de Broglie, der im Stammschloss ein Privatlaboratorium unterhielt, wandte sich Louis der Physik zu. De Broglies Dissertation über die Materiewellen wurde erst akzeptiert, nachdem sich Einstein darüber positiv geäußert hatte. 1929 erhielt er den Nobelpreis für Physik.

Beispiel 3.2

Wellenlänge eines Elektronenstrahls

a) Welche Wellenlänge hat ein Strahl eines Elektronenmikroskops (Beschleunigungsspannung 75 kV, Abb. 49.1)?
b) Welche Wellenlänge hat ein Staubkorn mit der Masse von 2 µg, das eine Geschwindigkeit von 100 m/s hat?

a) Mit Hilfe der Energie der Elektronen erhält man für die Geschwindigkeit v:

$$e \cdot U = \frac{m_e v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As} \cdot 750\,000\ \text{V}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} = \mathbf{1{,}6 \cdot 10^8\ m/s}$$

Das ist etwa 50 % der Lichtgeschwindigkeit!

Einsetzen in die De Broglie-Wellenlänge ergibt: $\lambda = \frac{h}{m_e \cdot v} = \mathbf{4{,}5\ pm}$

Das ist im Bereich der Wellenlängen von Röntgenstrahlung.

b) Für das Staubkorn gilt:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \mathbf{3{,}3 \cdot 10^{-27}\ m}$$

Diese Länge ist um viele Zehnerpotenzen kleiner als der kleinste Atomkern (das Proton hat etwa 10^{-15} m „Durchmesser"). Daher ist es nicht verwunderlich, wenn man im Alltag keine Beugungserscheinungen von Materiewellen bemerkt.

Abb. 49.1 *In der Mitte des Bildes ist das Beugungsmuster eines* ***Doppelspaltversuchs mit Elektronen*** *erkennbar. (Aufnahme mittels 75 keV – Elektronenstrahl)*

Ergänzung & Ausblick

„Quanten-Oktopus"

Wie groß können Quanten maximal sein?

Elementarteilchen, auch Neutronen und Protonen interferieren. Es stellt sich die Frage, ob es eine **obere Massengrenze** für die Interferenzfähigkeit gibt. Auch an der Universität Wien wurde dieser Frage nachgegangen. Eine Höchstleistung gelang mit **Nanopartikeln**. Dabei konnten die Wissenschafter mit einem „Molekularen Oktopus" das Quantenverhalten von Molekülen aus mehr als 400 Atomen nachweisen (Die Namensgebung ist auf die Gestalt der verwendeten Moleküle zurückzuführen, Abb. 49.2).

Können auch größere Objekte, wie Viren, Bakterien oder sogar Billardbälle Beugungseffekte aufweisen?

Das Beispiel 3.2 zeigt, dass solche Interferenzen sicher nicht messbar wären. Trotzdem wird weltweit geforscht, bis zu welcher Größe man noch von Quantenobjekten sprechen kann.

Abb. 49.2 *Künstlerische Sicht des Moleküls, mit dem Quanteninterferenz nachgewiesen werden konnte.*

Ergänzung & Ausblick

Technische Bedeutung der Materiewellen

Ein Grundlagenforscher in den 30er-Jahren des 20. Jh. hätte sich nicht einmal im Traum die ungeheuer vielfältige Anwendung der Quantenphysik vorstellen können.

- **Mikroelektronik:** Bei der Herstellung kleinster Bauteile in der Elektronik ist man schon längst in Größenordnungen angelangt, bei denen die Wellenlänge von Materiewellen eine wesentliche Rolle spielt.

  Das Kristallgitter stellt für Elektronenstrahlen mit geeigneter Wellenlänge ein Beugungsgitter dar. Beachtet man die Welleneigenschaften des Elektrons, dann versteht man auch die elektrischen Eigenschaften der Materie wie:

  – das Fließen von Strom und

  – den Ohm´schen Widerstand.

  Die Erkenntnisse der Quantenmechanik sind eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung von

  – Halbleitern und von

  – Supraleitern.

- **Elektronenmikroskop** (*electron microscope*): Epochal war wohl die Entwicklung des Elektronenmikroskops durch Ernst Ruska; er erhielt dafür 1986 (mehr als ein halbes Jahrhundert nach dem ersten Einsatz seines Elektronenmikroskops) den Nobelpreis für Physik.

Abb. 50.1 *Der Vergleich zeigt links das Licht- und rechts das Elektronenmikroskop.*
In ***Elektronenmikroskopen*** *verwendet man elektrische und magnetische Felder („magnetische Linsen"), um den Elektronenstrahl abzulenken.*

Abb. 50.3 *Tabakmosaikvirus: eines der ersten Aufnahmen mittels Transmissions- Elektronenmikroskop (1945).*

Abb. 50.2 ***Facettenauge einer Stubenfliege****, Aufnahme mittels Raster-Elektronenmikroskop*

Mit einem Licht-Mikroskop können im Allgemeinen nur Objektpunkte voneinander getrennt wahrgenommen werden, deren Abstand größer ist als die Wellenlänge der verwendeten Strahlung (**Auflösungsvermögen** siehe **Band 3, Kapitel 5.4.2**). Beugungserscheinungen verhindern eine bessere Auflösung. Durch entsprechende Wahl der Beschleunigungsspannung kann der Impuls der Elektronen (und damit die Wellenlänge der Elektronenwelle) in eine Größenordnung gebracht werden, die weit unter der der Lichtwellenlänge liegt **(Beispiel 3.2)**. Damit sind bildgebende Untersuchungen bis in atomare Dimensionen möglich.

Merk & Würdig

De Broglie-Wellenlänge: $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

h … Planck´sches Wirkungsquantum ($h \approx 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Js);
m … Masse; *[m] = kg*
v … Geschwindigkeit; *[v] = m/s*

Übungen

Wenn du die Beispiele löst, dann kannst du zum Thema Materiewellen Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse abschätzen bzw. errechnen!

Ü 3.6 Berechne die Geschwindigkeit eines Elektrons, dessen de Broglie-Wellenlänge gleich groß ist wie die von sichtbarem Licht (700 nm).

Ü 3.7 **„Quanten-Oktopusse"** **(Seite 49)** sind riesengroße Moleküle. Mit ihnen konnte Quanteninterferenz nachgewiesen werden. Welche Masse hat so ein Riesenmolekül? Gib das Ergebnis auch in Vielfachen der atomaren Masseeinheit an. De Broglie-Wellenlänge: 1 pm; Geschwindigkeit des Quantenobjekts: 1 m/s; $u = 1{,}6 \cdot 10^{-27}$ kg.

Ü 3.8 *Calculate the wavelength of an electron in a metal wire carrying an electric current. Electrons have an average speed between collisions with metal atoms of about $2 \cdot 10^6$ m/s.*

3.2.3 Das Spiel der Quanten mit dem Zufall

(The interplay of quanta with probability)

„Schizophrene" Lichtquanten

Ein bemerkenswertes Ergebnis entsteht, wenn das Doppelspalt-Experiment etwas abwandelt wird:

Experiment

Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen

Man lässt Photonen „nacheinander" durch den Doppelspalt fliegen. Im Experiment reduziert man durch Einschieben von Filterscheiben die auf den Doppelspalt einfallende Lichtintensität. Somit treffen nur mehr wenige Photonen pro Zeit auf den Detektor **(Abb. 51.1)**.

Dies führt zu einem überraschenden Ergebnis:

- Nun lassen sich **einzelne Photonen** erkennen.
- Auch ein **Beugungsmuster** ist in ein und demselben Experiment ersichtlich!

Vergleichbare Experimente lassen sich mit allen Quantenobjekten (mit Elektronen, Neutronen, …) durchführen.

Abb. 51.1 *Die drei **Interferenzmuster** unterscheiden sich in der Bestrahlungsdauer.*
Links: 10 000 Photonen
Mitte: 1 000 Photonen
Rechts: 28 Photonen

Quanten interferieren mit sich selbst

Bei Quanten interferieren die einzelnen Photonen auch, wenn man sie „tröpfchenweise" durch die Spalten lässt. Sie bilden als Gesamtheit ein Muster. So als würde ein Photon sich in zwei „Persönlichkeiten" teilen, durch beide Spalten fliegen und mit sich selbst interferieren. Danach, bei seinem Nachweis, lässt sich das Photon wieder als „eine Persönlichkeit", als Teilchen lokalisieren!

Dies ist mit der klassischen Physik nicht mehr in Einklang zu bringen. Hier sind Aspekte der Wellen und Teilchennatur des „schizophrenen" Photons in einem Experiment erkennbar.

"We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, … , which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery." R. FEYNMAN 1965

Frei übersetzt: „Wir müssen zur Kenntnis nehmen, dass wir es mit einem Phänomen zu tun haben, das unmöglich, absolut unmöglich ist … (Im Doppelspalt-Experiment schlägt) das Herz der Quanten-Mechanik. In Wirklichkeit enthält es das alleinige Geheimnis."

Quanten spielen mit dem Zufall

Mit **Wahrscheinlichkeitswellen** lassen sich die beschriebenen Interferenzmuster berechnen: Wahrscheinlichkeits**wellen** können interferieren. Bei konstruktiver Interferenz ist die Wahrscheinlichkeit größer ein Teilchen anzutreffen als bei destruktiver Interferenz.

Der österreichische Nobelpreisträger Erwin Schrödinger[1)] hat den rechnerischen Formalismus entdeckt. Die nach ihm benannte **Schrödingergleichung** ist eine **Wellengleichung**, die das Verhalten von Quantenobjekten beschreibt.

Abb. 51.3 *E. SCHRÖDINGER*

[1)] ERWIN SCHRÖDINGER (1887 Wien – 1961 Wien), österreichischer Physiker. Professor in Zürich, Berlin, Oxford und Graz. 1939 musste Schrödinger fliehen. Er fand eine neue Wirkungsstätte an der Universität von Dublin (Irland). Ab 1955 verbrachte Schrödinger seine letzten Lebensjahre wieder in Österreich. Schrödinger zeichnete sich durch eine außerordentliche Vielseitigkeit aus. Er kannte die Philosophie, die Literatur und viele Sprachen, er verknüpfte Quantenphysik und Genetik und er war bekannt für seine hervorragenden Vorlesungen. Schrödingers Leben ist gekennzeichnet durch Abwechslung, sowohl im Privatleben als auch im beruflichen Bereich, von kreativen Schaffensperioden und schöpferischen Pausen. Er erhielt 1933 den Nobelpreis für Physik.

Ergänzung & Ausblick

Die Wellenfunktion Ψ *(the wave function Ψ)*

„Psi", so wird der griechische Buchstabe Ψ ausgesprochen, ist die Funktion, mit der das Problem der Doppelnatur der Quanten mathematische beschrieben werden kann.

Die **Wahrscheinlichkeit P** ein Teilchen in einem bestimmten Bereich Δx aufzufinden wird durch $\Psi^2 \cdot \Delta x$ angegeben.

Der Wahrscheinlichkeitsbegriff erlaubt keine sinnvolle Aussage über einen Einzelvorgang. Dies bedeutet, dass beispielsweise der Weg eines einzelnen Photons (z. B. im Doppelspaltversuch) vom Zufall bestimmt ist und für uns nicht eindeutig beschreibbar ist.

Im Unterschied zu Schall- oder Lichtwellen schwingt in einer Wahrscheinlichkeitswelle Ψ weder Materie noch ein elektrisches Feld.

Die vollkommen abstrakte **Wellenfunktion Ψ** und die dazugehörige Wellengleichung (**Schrödingergleichung**) sind mathematisch anspruchsvoll. Heute ermöglichen Großrechenanlagen die komplizierten Berechnungen von

- Quantenzuständen in der Chemie (Molekülorbitale),
- Energien der Elektronen in der Festkörper- und Halbleiterphysik,
- dem Verhalten der Neutronen und Protonen im Atomkern in der Kern- und Astrophysik.

„Im Augenblick plagt mich eine neue Atomtheorie. Wenn ich nur mehr Mathematik könnte! Ich bin bei dieser Sache sehr optimistisch und hoffe, wenn ich es nur rechnerisch bewältigen kann, so wird es sehr schön."
E. SCHRÖDINGER

Abb. 52.1 *Karikatur aus „The New Yorker" zur Quantenphysik, 1940. „Der Schifahrer als Quantenobjekt!"*

Merk & Würdig

- **Teilchenmodell:** Experimente wie der Photoeffekt lassen auf eine Teilchenstruktur der Quanten schließen.
- **Wellentheorie:** Experimente im Zusammenhang mit Interferenzerscheinungen lassen auf eine Wellennatur der Quanten schließen.
- In der **Quantenmechanik** kann das Verhalten von **Quantenobjekten** mit **Wahrscheinlichkeitswellen** beschrieben werden. (Photonen, Elektronen, Neutronen … sind also weder Wellen noch klassische Teilchen, sondern müssen als prinzipiell neuartige Objekte verstanden werden.)
- Die Quantenmechanik macht mit der Angabe der Wahrscheinlichkeit nur **statistische** Aussagen.

Zusammenhang Teilchen – Welle:

Teilchen		Welle
Energie E	$\mathbf{E = h \cdot f}$	Frequenz f
Impuls p	$\mathbf{p = h / \lambda}$	Wellenlänge λ
Wahrscheinlichkeit P	$\mathbf{P = \Psi^2 \cdot \Delta x}$	Wellenfunktion Ψ

Abb. 52.2

„Gott würfelt …"

Die Unanschaulichkeit der Quantenmechanik hat auch unter den Physikern zu teils heftigen Diskussionen geführt. Einstein und Schrödinger waren mit der Wahrscheinlichkeits-Interpretation der Quantenmechanik sehr unglücklich. Am bekanntesten ist wohl Einsteins Zitat: **„Gott würfelt nicht"** („*I cannot believe that God plays dice with the cosmos.*" Observer, 1954).

Stephen Hawking hat 50 Jahre später dazu gemeint: *„God not only plays dice, he also sometimes throws the dice where they cannot be seen."* („Gott würfelt nicht nur, manchmal wirft er die Würfel auch so, dass man sie nicht sehen kann.") Nach heutigem Wissensstand kann man getrost sagen: **„Im Quantenreich wird gewürfelt!"**

3.3 Heisenbergs Unschärferelationen

(Heisenberg´s uncertainty principles)

„Höret, was Erfahrung spricht: Hier ist's so wie anderswo. Nichts Genaues weiß man nicht, dieses aber ebenso."
OTTO GRÜNMANDL, Elektrotechniker und Kabarettist

In der Welt der Quanten gelten andere Gesetze als in der Welt, die wir „direkt" wahrnehmen. Der Zufall bestimmt den Ablauf der Dinge, wie die letzten Kapitel gezeigt haben.
„… Nichts Genaues weiß man nicht …"
Wie genau man nichts weiß – das hat Werner HEISENBERG herausgefunden. Heisenberg ging von einem Gedankenexperiment aus:

Experiment

Gedankenexperiment
„Heisenbergs Gammastrahlen-Mikroskop":
Ein sehr kleines Objekt (Q) wird untersucht. Der Ort von Q soll exakt bestimmt werden. Dazu verwendet man Gammastrahlung, also „Licht" mit sehr kleiner Wellenlänge, um eine hohe Auflösung zu erhalten. Der Einfachheit halber betrachten wir nur ein γ-Quant, das auf das Objekt Q fällt.

Nach der De Broglie-Gleichung besitzt dieses Quant einen Impuls p, der umso größer ist, je kleiner seine Wellenlänge ist: $\lambda = h/p$

Das Objekt Q erfährt durch die Messung seines Ortes einen Impuls (es wird „angestoßen"). Somit kann der Ort von Q nicht präzise bestimmt werden. Je genauer man messen will, umso kleiner muss die Wellenlänge λ gewählt werden; damit wird aber der Impuls p größer, mit dem das Objekt Q weggestoßen wird.

Abb. 53.1

3.3.1 Impuls-Ortsunschärfe *(uncertainty of position and momentum)*

Heisenberg hat im Jahr 1926 formuliert:

Es ist unmöglich exakt den Impuls und den Ort eines Quantenobjekts gleichzeitig zu bestimmen.

Eine quantitative Auswertung des Gedankenexperiments führt zur Gleichung:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

Δx … Ortsunschärfe
Δp … Impulsunschärfe
h … Planck´sches Wirkungsquantum

Die Unschärferelation ist ein grundlegendes Prinzip! Sie gilt bei **allen** Vorgängen der Quantenwelt – auch wenn kein „Beobachter" zugegen ist. *„Schließlich weiß die Natur ja nicht, ob gerade gemessen wird."*

Makrokosmos: Da die Planck'sche Konstante h klein ist, hat die Beziehung bei der Beobachtung makroskopischer Körper keine Bedeutung. Erst bei Objekten, bei denen das Produkt aus Orts- und Impulsunschärfe in die Größenordnung von h fällt, muss die Ungleichung beachtet werden **(Ü 3.13)**.

[1] WERNER KARL HEISENBERG (1901 Würzburg – 1976 München), deutscher Physiker. Heisenberg studierte theoretische Physik in München. Er entwickelte die Quantentheorie, ferner arbeitete er über Kernphysik und Höhenstrahlung. Mit der Matrizenmechanik legte er neue mathematische Grundlagen für die Untersuchung der Quantenmechanik. 1941 – 1945 war Heisenberg Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik in Berlin. Nach dem Zweiten Weltkrieg war Heisenberg Direktor des Max-Planck-Instituts für Physik und Vorsitzender des Deutschen Forschungsrats. Dass Heisenberg in der Zeit des Nationalsozialismus nicht emigrierte und am „Uran-Projekt" (Bau einer Atombombe – diese konnte jedoch nicht fertiggestellt werden) arbeitete, brachte ihm noch Jahre später Kritik ein. 1932 erhielt er den Nobelpreis für Physik.

Abb. 53.2 *HEISENBERG*

Beispiel 3.3

Bahn eines Elektrons

Nach dem Rutherford´schen Atommodell sollten Elektronen mit einer bestimmten Geschwindigkeit kreisen. Mit Hilfe der Unschärferelation kann gezeigt werden, zu welch absurden Folgerungen dieser falsche Ansatz führt.

Annahme: Das Elektron kreist mit einer Geschwindigkeit von $2 \cdot 10^6$ m/s. Die Unsicherheit der Geschwindigkeitsangabe sei 0,01 %.

$\Delta v = 2 \cdot 10^2$ m/s;
Impulsunschärfe: $\Delta p = m \cdot \Delta v$; Unschärferelation: $m \cdot \Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$

Mit der Masse des Elektrons von $0{,}92 \cdot 10^{-30}$ kg ergibt sich (nichtrelativistisch) gerechnet für die Ortsunsicherheit:

$$\Delta x \geq \frac{h}{4\pi \cdot m_e \cdot \Delta v} \Rightarrow \mathbf{\Delta x \geq 0{,}29 \cdot 10^{-7}\ m}$$

Der Atomdurchmesser ist in der Größenordnung von 10^{-10} m. Die Unsicherheit der Ortsbestimmung ist 100 mal so groß, wie der ganze Atomdurchmesser!

Im Zusammenhang mit Atomen muss daher die Vorstellung einer Elektronenbahn aufgegeben werden.

Elektron
Kern

Abb. 54.1 ***Rutherford´sches Atommodell:*** *Es ist veraltet, da mit dem Modell der Elektronenbahnen die Experimente der Quantenmechanik nicht erklärt werden können.*

Stimmt das?

In einer **Blasenkammer** (**Abb. 53.2**) können **Spuren** von Elektronen festgestellt werden. Widerspricht das nicht dem Unschärfeprinzip?

Die Spuren in einer Blasenkammer sind relativ „dick". Die Ortsunschärfe ist so groß, dass die Impulsunschärfe klein bleibt und kein Interferenzmuster auftritt. Der Bahnbegriff macht in diesem

Fall Sinn. Siehe auch **Ü 3.10**.

Abb. 54.2 *Blasenkammer*

Beispiel 3.4

Das Elektron im Käfig

Ein Elektron wird „in einen Käfig eingesperrt". Die Lage des Elektrons soll dabei auf einen sehr kleinen Bereich von der Größe des Atomkerndurchmessers (10^{-14} m) beschränkt werden. Gesucht ist die Unschärfe der Geschwindigkeit des Elektrons.

$$m \cdot \Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \Rightarrow \Delta v \geq \frac{h}{m \cdot \Delta x \cdot 4\pi} \Rightarrow \mathbf{\Delta v \geq 5{,}8 \cdot 10^9\ m/s}$$

Die Geschwindigkeitsunschärfe wäre weit größer als die Lichtgeschwindigkeit! Damit ist sichergestellt, dass es unmöglich ist, ein Elektron in „einen so kleinen Käfig zu sperren".

Dies ist ein Argument, dass ein Elektron nicht in den Atomkern „stürzen" kann. Ein Elektron hat auf Grund der Unschärferelation im Kernbereich **keine „Aufenthaltserlaubnis"**!

ZOOARTIKEL
im Abverkauf: Elektronenkäfige

Abb. 54.3

Komplementarität *(complementarity)*

Die Unbestimmtheit gilt generell für Größenpaare, die miteinander in bestimmter Weise mathematisch verknüpft sind (siehe „Wirkung" **Seite 55 unten**). Man nennt solche Größen **komplementär**. Es gibt allerdings einige Eigenschaften, die nicht dem Unschärfeprinzip unterliegen. Beispielsweise hat die **elektrische Ladung** bei Messungen immer denselben „scharfen" Wert Q. Komplementäre Größen sind außer Ort und Impuls auch Zeit und Energie.

Ergänzung & Ausblick

Wellenpakete

Will man beispielsweise ein Photon mit einer reinen Sinuswelle beschreiben, dann hat diese kein Ende und keinen Anfang. Die Frequenz, der Impuls und die Energie wären dann zwar exakt beschreibbar, aber nicht der Ort des Photons. Die Wellenfunktion eines lokalisierbaren Teilchens muss die Form eines Wellenpakets haben **(Abb. 55.2)**.

+

=

Abb. 55.1 *Schwebung: Ein Experiment der Akustik **(Band Schwingungen)** zeigt: Durch Addition zweier Wellen (mit nahezu gleicher Frequenz) werden lokale Verdichtungen erzeugt. Weitere Überlagerungen **(Abb. 55.2)** führen zu einem Wellenpaket.*

$-\infty$ $+\infty$

Wellenlänge und Impuls des Photons ist exakt bestimmbar, sein Ort ist völlig unbestimmt.

λ

Δx

Durch die Überlagerung von Wellenlängen kann man eine lokalisierbare Welle erzeugen.

Abb. 55.2 *Durch Fouriersynthese kann eine lokalisierbare Welle (Wellenpaket) erzeugt werden.*

Bei der **Fouriersynthese** werden viele Sinuswellen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude addiert. Damit ist es möglich, ein räumlich (und zeitlich) lokalisierbares Wellenpaket zu erzeugen. Je stärker der Ort eingeschränkt werden soll, desto unterschiedlichere Frequenzen muss man überlagern. Damit wird aber die Frequenzunschärfe (und damit die Impulsunschärfe) erhöht.

Aus obigen rein mathematischen Überlegungen folgt, dass durch eine exakte räumliche Lokalisierbarkeit der Impulswert vergrößert wird. **Das Unschärfeprinzip ist eine Folge der Welleneigenschaften von Quantenobjekten!**

3.3.2 Energie-Zeitunschärfe *(uncertainty of energy and time)*

Der Impuls ist mit der Frequenz verknüpft: $p = h / \lambda = h \cdot f / c$ **(Kapitel 3.2.2)**. Somit muss auch eine **Frequenzunschärfe** bestehen und da die Frequenz mit der **Energie** verknüpft ist, muss auch die Energie unscharf sein!

Heisenbergs Unschärferelation für die Energie lautet:

$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$ **Energie-Zeitunschärfe**

Je schärfer ein Wellenpaket in der Zeit definiert ist, umso unschärfer ist seine Energie bestimmt.

Die Energie-Zeitunschärfe hat wichtige und unglaubliche Konsequenzen, wie die nächsten Kapitel zeigen werden. Aus dieser einfachen Ungleichung folgt, dass im Quantenreich der Energieerhaltungssatz kurzfristig ungültig ist und beispielsweise

- ein Elektron sich kurzerhand Energie ausborgen kann (**Tunneleffekt**),
- der Begriff Vakuum als leerer Raum zu hinterfragen ist,
- Kräfte mit Hilfe von Wechselwirkungsteilchen erklärt werden können.

Wirkung *(action)*

Das Produkt der beiden Größen Energie und Zeit (aber auch Impuls und Weg) hat die Einheit Joule mal Sekunde. Dieses Produkt nennt man auch Wirkung. Daher stammt die Bezeichnung **Wirkung**squantum für die Planckzahl h.

BIN ICH DA ? . . .
. . . ODER BIN ICH DORT ?
ACH, VERGISS ES !
ICH WEIß JA NICHT MAL,
OB ICH EINE WELLE
ODER EIN TEILCHEN BIN !

Abb. 55.3 *„Identitätskrise eines Photons"*

Messproblem und Quantenphysik

Das Unschärfeprinzip hat vom Prinzip her **nichts** mit der **Messgenauigkeit der klassischen Physik** zu tun. Messgeräte sind nicht vollkommen genau und jede Messung ist mit der Wechselwirkung Messgerät – Messgröße verbunden.

Auch ein **quantenphysikalischer** Messvorgang ist ein Eingriff in den Naturvorgang. Bei der quantenphysikalischen Messung ist man allerdings um einige Größenordnungen näher bei den Objekten der Quantenwelt als in der klassischen Physik. Die Messung führt zu einer Störung des Quantenzustandes.

Merk & Würdig

- **Impulsunschärfe:** Je schärfer der **Impuls** eines Teilchens festgelegt wird, umso unschärfer wird die Festlegung des Ortes.
- **Energieunschärfe:** Je schärfer ein Wellenzug in der **Zeit** definiert ist, umso unschärfer wird seine Frequenz und damit seine **Energie**.
- Die Unschärferelationen gelten prinzipiell bei **allen** Vorgängen der Quantenwelt – auch wenn kein „Beobachter" zugegen ist.
- Eine Konsequenz der Unschärfe betrifft das **Atommodell**: Die Heisenberg´schen Ungleichungen erlauben keine „Bahnen", auf denen sich Elektronen bewegen.

3.3.3 Der Tunneleffekt *(tunnel effect)*

„Ein Quant sieht Licht am Ende des Tunnels …"

In der klassischen Physik gilt der Energieerhaltungssatz: Energie kann nicht einfach aus dem Nichts entstehen.

In der Quantenmechanik ist das anders! Es ist möglich, dass sich ein Quantenteilchen Energie „ausborgt". Allerdings muss die **Energie-Zeit-Unschärferelation** gewahrt werden. Die „ausgeborgte" Energie ΔE muss innerhalb eines gewissen Zeitraums Δt wieder „zurückgegeben" werden.

Nach der Forderung der Energie-Zeit-Unschärfe gilt: Je kürzer der betrachtete Zeitraum Δt ist, umso größer ist der „Energiekredit" ΔE. Mit dieser Zusatzenergie ist es Teilchen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit möglich, Energiehürden zu überwinden. Unter diesen Bedingungen kann ein Quant eine Energiebarriere **„durchtunneln"**.

Abb. 56.1 ***Radioaktivität***
Der α-Zerfall lässt sich als Folge des Tunneleffekts verstehen. Die Potenzialwand der Kernkräfte kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vom α-Teilchen (= Helium-Kern) durchtunnelt werden; der Kern zerfällt.

Abb. 56.2 *In der klassischen Physik kommt der antrieblose, reibungsfreie Wagen vom Punkt A bis zum Punkt C und nicht weiter. Ein* ***„Quanten-Wägelchen"*** *jedoch kann Berge (****Potenzialbarrieren****) mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit überwinden. Es kann von C nach E unter gewissen Bedingungen* ***„durchtunneln"****!*

> *"It is possible in quantum mechanics to sneak quickly across a region which is illegal energetically"*
> RICHARD FEYNMAN
>
> Übersetzt: „In der Quantenwelt ist es möglich, sich durch eine energetisch verbotene Zone schnell hindurchzumogeln."

Der Tunneleffekt in der Elektronik

Einerseits beruhen elektrische Effekte der Halbleitertechnik auf dem Tunneleffekt, andererseits grenzt der Tunneleffekt auch eine weitere Miniaturisierung in der Chipherstellung ein: Der Tunneleffekt zwischen benachbarten Leitern ist störend.

Beispiel 3.5

Tunnelstrom *(tunneling current)*

„Ein Elektron geht zur Bank und will sich Energie ausborgen ... "

Tatsächlich macht es die Energieunschärfe möglich, dass sich ein Quantenobjekt für eine gewisse Zeit Energie „ausborgt". Angenommen, ein Elektron „benötigt" 1,5 eV um beispielsweise in einer elektronischen Schaltung ein Potential von 1,5 V zu überwinden. Welche Zeit steht diese Energie dem Elektron dafür zur Verfügung?

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \Rightarrow \Delta t \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta E} \Rightarrow \Delta t \geq \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{4\pi \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} = \mathbf{\Delta t \geq 3{,}3 \cdot 10^{-16} s}$$

Die Zeit in der Größenordnung von 10^{-16} s ist sehr kurz. In solchen Zeiträumen können Elektronen nur Distanzen in atomaren Größenordnungen überwinden: Abstände, wie sie in mikroelektronischen Bauteilen vorkommen, müssen ausreichend groß sein damit der **Tunnelstrom** keine negativen Auswirkungen auf die Schaltfunktion ausübt.

Abb. 57.1

Tunneldiode *(tunnel diode)*

Ein wichtiger Bauteil (vor allem im Bereich der Mikrowellentechnik) ist die Tunneldiode **(Abb. 57.3)**. Die Diode ist extrem **hoch dotiert** und hat ein sehr **dünnes Übergangsgebiet** zwischen n- und p-Leiter. Wird eine kleine Spannung in Durchlass- oder Sperrrichtung an die Tunneldiode angelegt, fließt durch die dünne Sperrschicht ein Tunnelstrom. Tunneldioden ermöglichen besonders schnelles Schalten. Es ist daher eine Anwendung im Bereich der Mikrowellenstrahlung möglich.

Abb. 57.2 *Kennlinie einer Tunneldiode*

Abb. 57.3 ***Tunneldiode:*** *Kontaktierung des Halbleiters. In der Mitte oberhalb des Würfels befindet sich die extrem schmale Raumladungszone (Aufnahme mittels Elektronenmikroskop)*

Das Raster-Tunnel-Mikroskop *(scanning tunneling microscope)*

Dieses Mikroskop **(Seite 58)** beruht auf dem quantenmechanischen **Tunneleffekt**. Es kann Unebenheiten auf Oberflächen von Metallen und Halbleitern und unterschiedliche Materialzusammensetzung bis in atomare Größenordnungen sichtbar machen. Zwar kann für Auflösungen in Bereichen weit unter der Lichtwellenlänge auch ein Elektronenmikroskop eingesetzt werden. Das Raster-Tunnelmikroskop ist aber im Vergleich dazu

- sehr einfach und billig,
- es ermöglicht zerstörungsfreie Beobachtung der kleinsten Strukturen und
- es ist oft nicht viel größer als ein Mobiltelefon.

Abb. 57.4 ***Raster-Tunnel-Mikroskop-Aufnahme*** *Die Farben wurden „fantasievoll" nachbearbeitet. 48 Eisenatome sind in einem kreisförmigen Ring auf einer Cu-Oberfläche platziert. Dabei bilden die Oberflächenelektronen kreisförmige stehende Wellen aus. Fantastisch: Man kann auf dieser Aufnahme die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen sehen.*

Ergänzung & Ausblick

Funktion des Raster-Tunnel-Mikroskops

Mit Hilfe des **piezoelektrischen Effekts** wird eine feine Nadel mit ungeheurer Präzision in x- und y-Richtung über die Probe gelenkt **(Abb. 58.1)**. Die Spitze wird dabei sehr nah über der Oberfläche geführt und „tastet" dabei die Probe ab. Schließt man eine kleine Spannung U zwischen Spitze und Probe, dann kommt es zum quantenmechanischen „Tunneln" der Elektronen zwischen dem isolierenden Abstand Nadel – Probe. Es fließt der **Tunnelstrom**. Die Stromstärke ist abhängig vom Abstand zwischen Spitze und Probe. Dieser Strom steuert über einen Regelkreis die Piezomechanik so an, dass der Abstand zwischen Spitze und Probe gleich bleibt.

Die Koordinaten der Nadelspitze werden mit Computerhilfe zu einem 3-dimensionalen Bild verarbeitet. Am Ende der Spitze sitzt oft nur ein einziges Atom; dies ermöglicht „Aufnahmen" sogar mit atomarer Auflösung.

Abb. 58.1

Abb. 58.2

3.3.4 Virtuelle Teilchen *(virtual particles)*

„Geisterteilchen erscheinen aus dem Nichts …"

Die Unschärferelation lässt zu, dass nicht nur Energie, sondern auch Masse aus dem Nichts entsteht und kurze Zeit später wieder verschwindet. Da der Zeitraum sehr kurz ist, nennt man solche Teilchen **virtuelle Teilchen**.

„Spielregeln" für virtuelle Teilchen:

- Es muss das Konzept der Energieunschärfe und das Prinzip der Äquivalenz von Masse und Energie miteinander verknüpft werden **(Beispiel 3. 6)**.
- Die Impulsunschärfe muss der Heisenberg-Relation entsprechen.
- Weiters müssen auch alle anderen Erhaltungssätze eingehalten werden. (Beispielsweise muss die Gesamtladung der aus dem Nichts entstandenen Teilchen null sein. Somit können nur **Teilchen – und Antiteilchenpaare** entstehen.)
- Je kürzer solch ein Teilchen existiert, umso größer können seine Ruhemasse, sein Impuls und seine Energie sein.
- Durch die „Ablaufzeit" ist jedem virtuellen Teilchen auch eine gewisse begrenzte **Reichweite** zugeordnet.

Zu Regeln gibt es üblicherweise Ausnahmen:

Virtuelle Photonen haben keine Ruhemasse, sie sind mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs und für sie bleibt wegen der relativistischen Zeitdehnung die Zeit stehen. Daher ist ihre Lebensdauer (und ihre Reichweite) **nicht** begrenzt, sondern unendlich!

Stimmt das?

Ist das Vakuum wirklich leer?

Die Heisenberg´schen Unschärferelationen lassen keine absolute Leere zu: Für die Zeitdauer, die von der Energie-Zeit-Unschärfe vorgegeben wird, können **virtuelle Teilchen** im Vakuum entstehen. Ein virtuelles Elektron kann nur zusammen mit einem positiv geladenen Teilchen mit gleicher Masse, dem sogenannten Positron, entstehen. Positronen sind sogenannte Antiteilchen. Damit gleicht das Vakuum einem brodelnden **Quantenschaum** aus virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paaren. Diese **Vakuumfluktuationen** *(vacuum fluctuation)* sind auch tatsächlich messbar!

Mit dem Konzept der **virtuellen Teilchen** geht das Konzept des leeren Raumes – des Vakuums – verloren!

Hinweis: Wie viel Energie im Quantenschaum des Vakuums steckt ist eine der größten noch ungelösten Fragen der Physik! (Stichwort: **Dunkle Energie**, **Seite 106**).

„Ton knetend formt man Gefäße. Doch erst ihr Hohlraum, das Nichts, ermöglicht die Füllung."
LAO-TSE, ca. 600 v. Chr.

Abb. 58.3 *Vakuumfluktuationen (Quantenschaum)*

Beispiel 3.6

„Geisterelektronen“ aus dem Nichts

Es soll die Lebensdauer und die maximale Reichweite eines virtuellen Elektrons abgeschätzt werden.

Ein Elektron-Positron-Paar hat eine Ruhemasse von etwa $2 \cdot 10^{-30}$ kg.

Für die Energie ergibt sich $E = m \cdot c^2 = 2 \cdot 10^{-30}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\ \text{m/s})^2 = 1{,}8 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$

Als Zeitunschärfe erhält man $\Delta t \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta E} \Rightarrow \Delta t \approx 10^{-22}\ \text{s}$

Auch wenn das Elektron fast mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist, ergibt sich nur eine Reichweite im Bereich von 10^{-13} m. Dies ist wirklich klein, wenn man bedenkt, dass ein Atomdurchmesser etwa die Größenordnung von 10^{-10} m hat.

Ergänzung & Ausblick

Fundamentale Kräfte *(fundamental forces)*

Nach heutiger Auffassung lassen sich alle physikalischen Vorgänge auf **vier fundamentale Kräfte** (Kapitel 5.3) zurückführen, auf

- die Gravitation,
- die elektromagnetische,
- die schwache und
- starke Wechselwirkung.

Drei dieser Kräfte werden in der Quantenfeldtheorie über den **Austausch virtueller Teilchen** erklärt. (Die Gravitation wird nicht durch die Quantentheorie beschrieben.)

Abb. 59.2 veranschaulicht, wie beim Wegwerfen und Fangen einer Masse über den **Impulsübertrag** eine Kraft vermittelt wird. Analog werden in der Quantentheorie Kräfte zwischen Teilchen durch Austauschteilchen beschrieben.

Wechselwirkung *(interaction)*

Nimmt man an, dass jedes **real** existierende Teilchen von einer **Wolke virtueller Teilchen** umhüllt wird, dann können diese während ihrer „Ablaufzeit“ in einem gewissen Ausmaß Impuls und Energie von einem realen Teilchen auf ein zweites reales Teilchen übertragen. Diese Wechselwirkung zwischen den realen Teilchen und der Wolke der virtuellen Teilchen ist eine Möglichkeit, die Wirkung eines **Kraftfeldes** zu erklären.

Masse und Reichweite:

Mit Hilfe der Energieunschärfe kann man die Masse der virtuellen Austauschteilchen und damit Stärke und Reichweite abschätzen. Einem **massereichen Teilchen** entspricht eine größere Energie ΔE; damit hat es aufgrund der Unschärferelation nur kurze Zeit Δt zur Verfügung und es besitzt folglich eine **kurze Reichweite**. Beispiel: W-Bosonen sind die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung. Sie haben eine große Masse und kurze Reichweite.

Abb. 59.1 *Mittels **Rückstoß** kann man die wechselwirkende Kraft zwischen den Booten begründen. Damit ist sowohl eine abstoßende Kraft (oben), als auch eine anziehende Kraft (unten) erklärbar*

Abb. 59.2 ***Wechselwirkung** vermittelt durch virtuelle Austauschteilchen.*

Merk & Würdig

Heisenberg´sche Ungleichung

- für Ort und Impuls:
  $$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$
- für Zeit und Energie:
  $$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Δx … Ortsunschärfe
Δp … Impulsunschärfe
ΔE … Energieunschärfe
h … Planck´sches Wirkungsquantum; $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J

Abb. 59.3

Ergänzung & Ausblick

Wo beginnt das „Reich“ der Quantenphysik?

Was kann man über den Grenzübergang zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik sagen?

- **Die Katze in der Kiste**

  Erwin SCHRÖDINGER hat das Thema mit einem Gedankenexperiment aufgegriffen: In einer Kiste („black box“), die sorgfältig alle Umwelteinflüsse abschirmt, befinden sich ein sehr **großes Quantenobjekt,** die **„Schrödingerkatze“** und eine todbringende Vorrichtung. Die „Todesmenagerie“ enthält alle Zutaten, um die Katze zu vergiften. Der Auslöser für den grausamen Tod ist ein zerfallendes radioaktives Atom. Zerfällt das Atom, dann wird Gift frei, das die Katze tötet. Man kann nun annehmen, dass das Präparat mit einer Halbwertszeit von einer Stunde zerfällt. Dann ist die Katze mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % nach einer Stunde tot.

  Was weiß man nun nach einer Stunde über die Katze in der Kiste?

  Die Katze ist in der geschlossenen Kiste nach den Regeln der Quantenmechanik in einem Überlagerungszustand. Sie ist zur Hälfte jeweils tot **UND** lebendig. Schrödinger hat mit dieser Überlegung natürlich nicht nur für arme „Schrödingerkatzen“, sondern für alle Quantenphänomene ein Problem bildhaft ausgedrückt: Er hat kritisiert, dass erst durch das Nachsehen, also durch das Messen entschieden wird, in welchem Zustand die Katze ist. Auch Einstein hat hier gezweifelt: *„Glauben Sie wirklich, der Mond ist nicht da, außer wenn jemand hinschaut?“*, sagte Einstein zu Bohr.

Abb. 60.1 *Tot UND lebendig*

- **Viel-Welten-Interpretation** *(many-worlds interpretation)*

  Eine eigenwillige Interpretation besagt nun Folgendes: Bei jedem Vorgang mit Quanten, bei dem der Zufall mitspielt, sind alle Möglichkeiten nicht nur fiktiv vorhanden, sondern sie werden auch realisiert. Alle quantenphysikalischen Möglichkeiten manifestieren sich dann jeweils in einem eigenen Universum **(Abb. 60.2)**. Also – am Beispiel der Schrödingerkatze – ein Universum mit der toten Katze und eines mit der lebenden Katze. Nach dieser Viele-Welten-Theorie **(Multiversentheorie)** müssten aber ununterbrochen neue Universen entstehen, unzählbar viele.

  Die Multiversentheorie klingt fantastisch. Sie wird auch von Science-Fiction-Autoren verwertet. Sie folgt aber logisch, wenn man den Wahrscheinlichkeitswellen absolute Realität zuschreibt.

"...UND DIE MULTIVERSENTHEORIE BESAGT, DASS ES DA DRAUSSEN NOCH WAS GEBEN SOLL ..."

Abb. 60.2

- **Dekohärenztheorie** *(quantum decoherence)*

  Eine andere, heute favorisierte Theorie geht zwar auch davon aus, dass die Wahrscheinlichkeitswellen real sind – aber nur für sehr kurze Zeit, der Dekohärenzzeit. Diese Zeit wäre für so große Objekte wie „Katzen“ unmessbar kurz. Die Katze war also nach dieser Theorie schon vor dem Hineinschauen in die Kiste tot **oder** lebendig. Je größer das Quantenobjekt ist, umso stärker wirkt sich die Umgebung aus und die Wahrscheinlichkeitswellen verändern sich dann extrem schnell. Es existieren schließlich Kraftwirkungen und Wärme! Man spricht vom Kollaps der Wellenfunktionen. (Beispielsweise verschwindet bei einem solchen Kollaps ein zuvor vorhandenes Interferenzmuster.)

  Neueste Experimente zeigen, dass im Lauf der Zeit die Wellenpakete der Wahrscheinlichkeitswellen sogar ohne Wechselwirkung mit der Umgebung von selbst zerfließen. Dies bedeutet, dass Quantenphänomene prinzipiell nur für mehr oder weniger kurze Zeiträume existieren.

  Die anfangs gestellte Frage lässt sich im Wesentlichen so beantworten: **Das „Reich“ der Quanten ist begrenzt.**

Aktuelle wird daran geforscht:

- Quantenphänome bei möglichst großen Objekten zu beobachten (Stichwort „Quanten-Oktopus" **Seite 49**),
- Wellenfunktionen über große Entfernungen zu bewahren (Stichwort „Quantenteleportation") oder
- Quantenzustände zu kombinieren (Stichwort „Quantencomputer“ und „verschränkte Teilchen“).

Übungen

Wenn du die folgenden Beispiele löst, dann kannst du zu den Themen Unschärferelationen, Tunneleffekt und Virtuelle Teilchen Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse abschätzen bzw. errechnen. Außerdem bist du dann in der Lage, naturwissenschaftliche Vorstellungen nach ihrer sachlichen Richtigkeit zu hinterfragen!

Ü 3.9 Ein Elektron fliegt „gemütlich" (30 km/h) durch einen Spalt mit einer Breite von 10 nm. In welcher Größenordnung liegt die Geschwindigkeitsunschärfe, die bei diesem Vorgang danach auftritt?

Ü 3.10 **Spur eines Elektrons?** Widerspricht das nicht der Unschärferelation? Begründe deine Antwort mittels folgender Rechnung: Es ist die Unschärfe der Ortsangabe einer Elektronenspur in einer **Blasenkammer** **(Abb. 54.2)** abzuschätzen. Die Geschwindigkeit des Elektrons ist $2 \cdot 10^6$ m/s.

Ü 3.11 **Staubkorn:** Im Kapitel 3.3 wird behauptet, dass bei einem Objekt makroskopischer Größenordnung (m = 1 mg) die Ortsunschärfe vernachlässigbar sein soll. Begründe dies mit Hilfe einer rechnerischen Abschätzung: Die Geschwindigkeit (300 m/s) sei mit 1 % Genauigkeit bekannt.

Ü 3.12 **Gepulster Laser:** Ein Lichtimpuls eines **Excimerlasers** hat eine Impulsdauer von 10 ns bei einer Wellenlänge von 250 nm. **a)** In welcher Größenordnung liegt die Breite einer ausgestrahlten Spektrallinie? **b)** Welche Folgen hätte es, wenn es technisch möglich wäre, die Impulsdauer noch weiter zu verkürzen?

Tipp: Die Breite der Linien ist ein Maß für die Energieunschärfe (über $\Delta E = h \cdot \Delta f$).

Ü 3.13 **Quantenschaum:** In **Abb. 58.3** sind auch virtuelle Protonen-Antiprotonenpaare dargestellt. **a)** Schätze die Zeitdauer ab, die solchen Paaren für ihren Ausflug in den Quantenschaum zur Verfügung steht. (Masse eines Protons: $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg) **b)** Wie weit können solche Teilchenpaare etwa kommen, wenn sie mit 3 % von c unterwegs sind?

Ü 3.14 **Wechselwirkungsteilchen:** Schätze die Lebensdauer und die Reichweite von Wechselwirkungsteilchen ab:

a) Virtuelles Z^0-Boson, es ist ein Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung, Ruhemasse: $1{,}6 \cdot 10^{-25}$ kg, Geschwindigkeit (fast) Lichtgeschwindigkeit.

b) Virtuelles Photon.

Ü 3.15 **Tunnelstrom:** Schätze ab, welche Energie (in Joule und eV) sich ein Elektron für eine Zeit von einer Pikosekunde kurzfristig zum Durchtunneln einer Strecke „ausborgen" kann?

Ü 3.16 **Lies aufmerksam! Was ist korrekt?**

Die Unschärferelationen können

- ☐ den Elektronen „verbieten" in den Atomkern zu fallen.
- ☐ beschreiben, wie genau ein Amperemeter der gehobenen Preisklasse funktioniert.
- ☐ jene Energie beziffern, die es makroskopischen Objekten ermöglicht, durch Wände zu tunneln.
- ☐ erklären, dass Vakuum nicht wirklich leerer Raum ist.

Ü 3.17 **Erkläre** kurz den physikalischen Hintergrund:

a) Das Bohr´sche Atommodell mit kreisenden Elektronen widerspricht den Unschärferelationen. Warum?

b) Im Gedankenexperiment verwendet Heisenberg ein Gammastrahlenmikroskop. Warum kein Lichtmikroskop?

c) Die Multiversentheorie **(Abb. 61.1)** versucht krampfhaft das Dilemma um die „Schrödingerkatze" zu bereinigen. Gibt es auch noch andere Erklärungsversuche?

Abb. 61.1

Ü 3.18 Angenommen man sperrt ein Elektron in einen „Käfig" (Potenzialtopf) und macht den Käfig immer kleiner. Welche der folgenden Aussagen ist richtig?

- ☐ Das Elektron erhöht seine Energie, da seine Impulsunschärfe steigt.
- ☐ Das Elektron wird sich ein Positron suchen und sich dabei in Strahlungsenergie auflösen.
- ☐ Zum Verkleinern des „Käfigs" benötigt man Energie.
- ☐ Das Elektron könnte mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch die Potentialwände durchtunneln.
- ☐ Elektronen lassen sich prinzipiell nicht „einsperren".

Ü 3.19 Auf **Seite 60** werden Stichworte wie **a)** „Quantencomputer" **b)** „verschränkte Teilchen" **c)** „Quantenteleportation" angeführt. Suche zu diesen Stichworten im Internet nach Informationen. Tipp: Schau nicht nur auf Seiten wie Wikipedia, sondern auch auf Seiten von Universitäten. Vielleicht findest du dort einfach verständliche Erklärungen, Animationen und interaktive Lehrbeispiele. Versuche zu den Themen in jeweils zwei drei Sätzen das Wesentliche zusammenzufassen.

Ü 3.20 In der esoterischen Literatur wird gern die Behauptung aufgestellt, dass wegen der Quantenphänomene alles mit allem zusammenhängt – über das ganze Universum hinweg – und dass daher ein großes universelles „Bewusstsein" existiert. Studiere **Seite 60** und finde ein oder zwei Argumente, die dieser Behauptung widersprechen.

4 Atom- und Kernphysik

In diesem Kapitel geht es um

- die Stabilität des Atomkerns
- das Wasserstoffspektrum
- Bindungsenergien
- Radioaktivität
- Wirkung ionisierender Strahlung
- Fission und Fusion

4.1 Atome *(atoms)*

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren die Eckdaten der positiven und negativen Ladung, also von Elektron und Proton bereits bekannt.
Proton: $q_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Elektron: $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, $m_p = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg
Die Vorstellung vom Aufbau eines Atoms stammte von J. J. Thomson[1]. Er nahm an, dass das Atom eine positive Masse sei, in der die negativen Ladungen gleichmäßig verteilt seien.
Die Mängel dieses Modells klärte Ernest Rutherford **(Band 2, Kapitel 2)** mit einem Streuversuch.

Abb. 63.1 *Für Thomson waren die Elektronen (grün) gleichmäßig im positiven Kern (rot) verteilt.*

Abb. 63.2 *Rutherford und seine Mitarbeiter Geiger und Marsden beschossen dünne Goldfolien (Dicke ≈ 10^3 Atomschichten) mit α-Teilchen. Mit dieser einfachen Versuchsanordnung entdeckte Rutherford den Atomkern.*

Abb. 63.3 *Die von links kommenden α-Teilchen werden nur vom Kern abgelenkt.*

Rutherford: *„It was quite the most incredible event that ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you had fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you."* Schon bei der Entwicklung des **Rutherfordmodells** war man sich mehrerer Probleme bewusst:

- Kreisende Elektronen erfahren eine Beschleunigung. **Beschleunigte Ladungen strahlen** andauernd Energie ab. Die Elektronen müssten sich daher (in Bruchteilen von Sekunden) auf einer spiralförmigen Bahn dem Kern nähern und das Atom wäre höchst instabil. Dies steht im Gegensatz zu Stabilität der Materie.
- Mit dem Atommodell von Rutherford kann man die **Linienspektren** *(line spectrums)* der Atome **nicht** erklären.

Die Probleme des Rutherford´schen Modells konnte Bohr mit der Annahme, die Elektronen kreisen wie kleine Planeten um den Atomkern, lösen. Er griff dabei auf die Idee von Planck zurück, der die gequantelte Abgabe von Strahlung einführte:

Die Quantenbedingung für ein strahlungsloses Elektron:

$$\mathbf{2 \cdot \pi \cdot r = n \cdot \lambda}$$

Auf dieser Basis formulierte er die heute als **Bohrs Postulate** bekannten Ansätze für die Stabilität des Atoms. Zunächst wandte er die Postulate nur für das einfach gebaute Wasserstoffatom an.

Das Bohr'sche Atommodell verwendet den Begriff der **„Bahn eines Elektrons"** im Atom. Erst als der Bahnbegriff im Rahmen der Quantentheorie verworfen wurde, gelangte man zu einer quantitativ richtigen Beschreibung des Atoms, bei der allerdings die Anschaulichkeit des Modells verloren gegangen ist. Man spricht heute nicht mehr von Elektronenbahnen, sondern von **Atomorbitalen** *(atomic orbitals)*, in denen sich die Elektronen mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten aufhalten (siehe auch **Kapitel 3.3.1, Beispiel 3.3**).

Merk & Würdig

Atommodell von Rutherford

Die negativen Elektronen kreisen um einen positiven Kern.

Abb. 63.4 *Eine in sich geschlossene Bahn ist im Sinne von Bohr für ein Elektron „erlaubt".*

Merk & Würdig

Zwei wichtige Bohr'sche Postulate

1) Ein Elektron kann den Kern nur auf bestimmten Bahnen strahlungslos umlaufen.
2) Der Übergang von einer kernferneren stationären Bahn zu einer kernnäheren erfolgt sprunghaft und unter Abgabe eines Energiequants.

[1] Joseph John THOMSON (1856 Cheetham Hill – 1940 Cambridge), britischer Physiker. Er entdeckte das Elektron.

Merk & Würdig

Atommodell von Bohr

Die Elektronen kreisen auf stabilen Bahnen um den Atomkern. Es setzt Gesetze der klassischen Physik außer Kraft.

Es war zwar bereits bekannt, dass der Ansatz, Elektronen kreisen auf „Bahnen" um den Kern, nicht richtig sein kann. Aber er konnte damit zunächst die Stabilität des Atoms beschreiben.
Unter der Voraussetzung, dass die Coulomb´sche Abstoßung und die Zentrifugalkraft des Elektrons einander das Gleichgewicht halten, berechnete Bohr die Radien der Elektronenbahnen.
Trotz des klassischen Ansatzes[1] war er in der Lage, die drei folgenden bekannten Eigenschaften des Atoms auf eine theoretische Weise abzuleiten.

1) Größe des Wasserstoffatoms: $r = 5{,}2917 \cdot 10^{-11}$ m

2) Ionisationsenergie $E = 2{,}18 \cdot 10^{-18}$ J = 13,6 eV

3) Frequenzen des Wasserstoffspektrums

Aus historischer Sicht und aus Gründen der Anschaulichkeit gibt es dieses Modell noch immer. Die Quantenbedingung $2 \cdot \pi \cdot r = n \cdot \lambda$ erlaubt es, die Überlegungen zu verallgemeinern:

$$r_n = n \frac{h^2 \varepsilon_0}{\pi e^2 m_e}$$

Man erkennt, dass der Radius der Elektronenbahn von n abhängig ist. n ist der relative Abstand des Elektrons vom Atomkern.

n = 1 … 1. stabile Bahn des Elektrons um den Kern

n = 2 … 2. stabile Bahn usw.

Aus der Chemie sind diese Bahnen als K-, L- … Schale bekannt.

Merk & Würdig

- Eine Beschreibung eines Atoms muss dessen Spektrum und dessen Stabilität erklären können.
- Bohr konnte mit seinem Ansatz die Spektren erklären; für die Stabilität traf er eine ad hoc-Annahme.
- Das Bohr´sche Modell erwies sich nicht als ausbaufähig.
- Für das Elektron im Wasserstoffatom gibt es einen Aufenthaltsraum mit einer bestimmten Größe. In ihm ist die Gesamtenergie des Atoms am kleinsten.
- Erst die Mathematik der Quantenmechanik **(Kapitel 3)**. liefert korrekte Ergebnisse.
- Dass Bohr für die Energie eines Elektrons im Wasserstoffatom richtige Werte erhielt, ist (ein glücklicher) Zufall.

Beispiel 4.1

Wie kann man sich ein Wasserstoffatom vorstellen, wenn man von den Elektronen nur die Aufenthaltswahrscheinlichkeit kennt?

Mit einem Streuexperiments **(Compton-Experiment, Kapitel 3.1.1)** mit sehr vielen Wasserstoffatomen führt man Ortsmessungen durch. Den erhaltenen Ort tragen wir in ein Diagramm als Punkt ein.

Wir erhalten ein anschauliches Bild, das auch quantenphysikalisch erklärt werden kann.

Aufenthaltswahrscheinlichkeit *P(r)* →

Abstand vom Kern *r* →

Abb. 64.1

[1] Für des Elektron soll gelten: Zentrifugalkraft … $F_z = F_c$ … Coulombkraft

Übungen

Überprüfe zum Thema Atomkern deine Fähigkeiten mit folgenden Übungen:

Ü 4.1 Wie erklärt Rutherford die Stabilität des Atoms?
Wie erklärt Bohr die Stabilität des Atoms?

Ü 4.2 Interpretiere folgende Aussage: Die Gesamtenergie eines Elektrons im Wasserstoffatom kann nicht als Summe aus potenzieller und kinetischer Energie angeschrieben werden.

a) Erkläre, warum man das nicht kann.

b) Was ist die potenzielle und kinetische Energie eines Elektrons?

c) Berechne E_{pot} in J und eV.

4.2 Das Wasserstoffspektrum *(spectrum of hydrogen)*

Für die Frequenzen der Spektrallinien im **diskreten Wasserstoffspektrum** (Abb. 65.2) gilt:

$$\Delta E\ (m \rightarrow n) = E_n - E_m = E_n \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

Dabei ist

$$E_{kin} = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e}{2} \cdot \left(\frac{e^2}{2h\varepsilon_0}\right)^2 = \frac{1}{n^2} \cdot E_n$$

m, n … Hauptquantenzahlen

Die Kombination der Gleichung E = h · f mit der obigen Gleichung liefert eine Formel für f. Somit lassen sich die Frequenzen beim Quantensprung eines Elektrons von der m-ten Schale in die n-te Schale ermitteln. Das Emissionsspektrum von Wasserstoff konnte somit theoretisch erklärt werden.

Merk & Würdig

R_∞ … Rydberg-Frequenz

R_∞ … $3{,}29 \cdot 10^{15}$ Hz

$$f = R_\infty \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

Abb. 65.1 *Emissionsspektrum des Wasserstoff*

Abb. 65.2 *Die Serien im Wasserstoffspektrum; der Schweizer Physiker Johann Balmer hat bereits 1885 die Gleichung*

$$f = R_\infty \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$ *empirisch gefunden.*

Er konnte allerdings dafür keine Erklärung angeben.

Beispiel 4.2

Wie groß sind die Wellenlängen der Lyman- und Balmer-Serie für m = 3 und m = 4?

Für die Balmer-Serie gilt n = 2, sodass wir in folgende Gleichung einsetzen:

$$f = R_\infty \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

m = 3:

$$f = 3{,}29\ 10^{15}\ s^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 4{,}57 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$$

Die Wellenlänge erhalten wir mittels der Gleichung $c = \lambda \cdot f$,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8\ m/s}{4{,}57 \cdot 10^{14}\ Hz} = \mathbf{656{,}6\ nm}$$ **… rot**

m = 4:

$$f = 3{,}29\ 10^{15}\ s^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right) = 6{,}17 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$$

Hier ergibt die Rechnung für λ = **486,2 nm … blau**. **(Abb. 65.2)**

Merk & Würdig

- Das Bohr´sche Modell liefert nur für das H-Atom richtige Werte.
  Für die korrekte Beschreibung aller anderen Atome muss die Quantentheorie angewendet werden.
- Springt ein Elektron von einer dem Kern ferneren Bahn mit der Quantenzahl m in eine dem Kern nähere Bahn mit der Quantenzahl n, so beträgt die emittierte Frequenz
  $f = R_\infty \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ mit $R_\infty = 3{,}29 \cdot 10^{15}$ Hz

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über Spektrallinien.

Ü 4.3 Schätze die Temperatur, bei der Wasserstoff ionisiert vorliegt. Hinweis: $E = 3/2 \cdot kT$ (siehe **Seite 132**); Ionisierungsenergie E = 13,6 eV

Ü 4.4 Berechne die Wellenlängen der Paschen-Serie für m = 4 und der Lyman-Serie für m = 3.

Ü 4.5 Woher weiß man, dass in den Sternen die gleichen chemischen Elemente auftreten wie auf der Erde? Welche Antworten sind korrekt?

a) Man kann das auf den Aufnahmen des Hubble-Teleskops erkennen.

b) Man kann es aus den Spektren herauslesen.

c) Man weiß es nicht; man nimmt es an.

d) Man schaut auf die Sternschnuppen. Die leuchten auch.

4.3 Der Atomkern – eine Wiederholung

(the nucleus – a revision)

Ordnungszahl Z = Anzahl der Protonen
Massenzahl A = Anzahl von Protonen Z und Neutronen N
Isotope besitzen gleich Anzahl von Protonen, aber unterschiedlich Anzahl von Neutronen. Isotope unterscheiden sich nur physikalisch (verschiedene Massen), jedoch nicht chemisch.
Schreibweise: ${}^{A}_{Z}X$ oder ${}^{A}X$

Protonen und Neutronen bilden die Bausteine des Atomkerns. Der Atomkern enthält fast die gesamte Masse des Atoms, da die Masse der Elektronen nur einen Anteil im Zehntel Promillebereich haben. Die Anzahl der Protonen und Neutronen im Kern klassifizieren eine Atomart, die man als **Nuklid** *(nuclide)* bezeichnet. Die etwa 2 700 bekannten Nuklide lassen sich einteilen in natürlich – künstlich bzw. stabil – instabil (oder radioaktiv).

- **Natürlich und stabil:** 268 Nuklide; z. B. ${}^{1}H$[1)], ${}^{12}C$, ${}^{16}O$, …
- **Natürlich und instabil:** ca. 50 Nuklide; z. B. ${}^{14}C$, ${}^{235}U$, ${}^{40}K$, …
- **Künstlich und stabil:** keine bekannt
- **Künstlich und instabil:** ca. 2 500 Nuklide, z. B. ${}^{239}Pu$, alle Transurane

Um einen Überblick über die Vielzahl der Nuklide zu erhalten, ordnet man alle Nuklide in einer **Nuklidkarte** *(chart of nuclides)*. **(Abb. 67.1)**

Merk & Würdig

Massenzahl oder **Nukleonenzahl A**

A = Z + N

Z … Zahl der Protonen, Ordnungszahl
N … Zahl der Neutronen

Anzahl der Protonen *N* →
Anzahl der Neutronen *N* →

Abb. 67.1 *Ausschnitt aus einer Nuklidkarte (leichtesten Kerne)*

4.4 Bindungsenergien im Atomkern

(binding energy in the nucleus)

Die meisten Elemente sind Isotopengemische. Die 21 % Sauerstoff unserer Atemluft bestehen zu 99,76 % aus dem Isotop ${}^{16}O$, zu 0,2 % aus dem Isotop ${}^{18}O$ und zu 0,04 % aus dem Isotop ${}^{17}O$. Bei der Bestimmung der Massenzahl eines Atoms eines chemischen Elements muss diese Isotopenverteilung berücksichtigt werden. Massenangaben im Periodensystem sind daher immer Durchschnittswerte.

Seit 1961 gilt folgende Vereinbarung: Die relativen Atommassen beziehen sich auf das Kohlenstoffisotop ${}^{12}C$ mit der relativen Atommasse $\mathbf{A_r = 12}$
Da die Masse eines Atoms sehr klein ist, führte man – ausgehend von A_r – den Begriff der **atomaren Masseneinheit** *(atomic mass unit)* **u** ein **(Band 1, Kapitel 2.1)**.

Die bekannte Beziehung $E = m \cdot c^2$ ergibt für 1 u die entsprechende Energie von 931,5 MeV. Um die Masse eines H-Atoms zu bestimmen, addiert man die Werte der **Tabelle 68.1** eines Elektrons und eines Protons.

Wir erhalten für ${}^{1}H$ den in der Tabelle enthaltenen Wert für $A_r = 1{,}007\,83$.

Wie sieht es für ein anderes Atom aus?

Die Rechnung für ${}^{12}C$ ergibt folgendes:
6 Protonen + 6 Neutronen + 6 Elektronen = 1 Atom ${}^{12}C$;
$6 \cdot 1{,}007\,28\ u + 6 \cdot 1{,}008\,67\ u + 6 \cdot 0{,}000\,55\ u = 12{,}099\ u$

Dies steht im Widerspruch zur Definition von $A_r = 12{,}000\,00$.
Die Differenz dieser beiden Massen nennt man **Massendefekt** *(mass defect)* **Δm** (siehe **Seite 31**).

Merk & Würdig

Absolute Atommasse

$m_o = A_r \cdot u$

m_o … absolute Atommasse, $[m_o] = kg$
A_r … relative Atommasse, $[A_r] = 1$
u … atomare Masseneinheit, $[u] = kg$

Merk & Würdig

Die **atomare Masseneinheit 1 u** ist der 12te Teil der Masse des Kohlenstoffisotops ${}^{12}C$.

$\mathbf{1\ u = 1{,}661 \cdot 10^{-27}\ kg}$

1) Die H-Isotope sind die einzigen Isotope, die Namen besitzen: ${}^{2}H$ nennt man Deuterium, ${}^{3}H$ nennt man Tritium

Merk & Würdig

Massendefekt

Die Masse eines Atoms ist kleiner als die Gesamtmasse der einzelnen Protonen, Neutronen und Elektronen.

Bei der Verschmelzung eines Protons mit einem Neutron wird Bindungsenergie frei.

Abb. 68.1 *Ein Proton und ein Neutron besitzen eine größere Masse als ^2H.*

Element	A_r	Element	A_r
^1H	1,007 83	^{16}O	15,994 92
^4He	4,002 60	^{222}Rn	222,017 53
^{12}C	12,000 00	^{238}U	238,048 61
^{14}C	12,003 24	^{242}Pu	242,058 73
Teilchen	**A_r**	**Teilchen**	**A_r**
Elektron	0,000 55	Neutron	1,008 67
Proton	1,007 28	α–Teilchen	4,001 51

Tab. 68.1 *Relative atomare Massen*

Merk & Würdig

Massendefekt

$$\Delta m = \Sigma m - m_0$$

Δm … Massendefekt
Σm … Summe der Einzelmassen
m_0 … Masse des Atoms

Merk & Würdig

Bindungsenergie

$$\Delta E = \Delta m \cdot c_0^2$$

Die Bindungsenergie beträgt im Mittel je Nukleon etwa 8 MeV.

Der Grund für diesen Massendefekt ist die Äquivalenz zwischen Masse und Energie. Bei der Bildung eines Atoms (Atomkerns) aus seinen Bestandteilen wird eine den entstehenden Massendefekt Δm entsprechende Energiemenge frei. Diese Energie nennt man **Bindungsenergie** *(binding energy)* des Atoms (Atomkerns)[1].

Um einen Atomkern zu zerlegen, müssten wir diesen Energiebetrag aufbringen. Die Bindungsenergie ist ein Maß für den Zusammenhalt eines Atoms oder Atomkerns. Ein günstigeres Maß ist die **Bindungsenergie je Nukleon**.

Es ist das Verhältnis der Bindungsenergie ΔE zur Anzahl A der Nukleonen: $\Delta E_N = \frac{\Delta E}{A}$

Die graphische Darstellung **(Abb. 68.2)** der Bindungsenergien je Nukleon aller Elemente ergibt eine der wichtigsten Kurven der Atomphysik. Wir werden auf sie noch öfters zurückkommen.

Abb. 68.2 *Das Eisen-Isotop ^{56}Fe ist gemeinsam mit dem Nickel-Isotop ^{62}Ni das stabilste Nuklid. Man benötigte etwa 8,8 MeV, um sie in ihre Einzelteilchen zu zerlegen. Im Gegensatz dazu besitzt ^2H eine geringe Bindungsenergie je Nukleon. Auch Uran besitzt eine vergleichsweise geringe Bindungsenergie, was für die Kernspaltung von Bedeutung ist* ***(Kapitel 4.6.1)****.*

[1] Die Bindungsenergie wird häufig mit einem negativen Vorzeichen versehen. Grund: Dem freien Elektron schreibt man die Energie Null zu. Das gebundene Elektron muss daher negative Energie besitzen.

Beispiel 4.3

Wie groß ist die Bindungsenergie je Nukleon von ^{238}U?

Zunächst berechnen wir uns die Summe aller Massen der Einzelteilchen:
92 Protonen + (238 – 92) Neutronen + 92 Elektronen = ^{238}U;
$92 \cdot 1{,}007\,28\ u + 146 \cdot 1{,}008\,67\ u + 92 \cdot 0{,}000\,55\ u = 239{,}986\ u$ (Die Masse eines Uran-Atoms beträgt daher $m_0 = 4 \cdot 10^{-25}$ kg.)

Aus **Tabelle 68.1** lesen wir A_r ab: 238,048 61 u.
Der Massendefekt Δm beträgt daher $\Delta m = 239{,}986\,18\ u - 238{,}048\,61\ u = 1{,}937\,57\ u$
Dies entspricht einer Bindungsenergie von $\Delta E = -\ 1804{,}8$ MeV.
Da 238 Nukleonen enthalten sind, entfallen auf jedes Nukleon –7,58 MeV.

Hinweis: Bei der Kernspaltung wird diese Energie allerdings nicht zu Gänze frei.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über Atomkerne.

Ü 4.6 Berechne die Bindungsenergie je Nukleon von ^{56}Fe ($A_r = 55{,}934\,94$ u).

Ü 4.7 Welche der folgenden Antworten ist richtig, welche falsch? Kreuze an.

	richtig	falsch
a) Die Anzahl der Neutronen darf nie größer sein als die Ordnungzahl.	☐	☐
b) 1 u = 933 MeV	☐	☐
c) Das Ganze ist gleich der Summe der Einzelteile.	☐	☐
d) 1 u gibt die Masse eines Protons an.	☐	☐
e) Ist die Bindungsenergie groß, so ist der Kern stabil.	☐	☐

Ü 4.8 Vergrößert man gedanklich ein H-Atom auf die Größe eines Fußballs, der auf der Mittelauflage liegt, in welcher Entfernung befindet sich bei gleichem Maßstab das Elektron?

Radius eines Protons $r_p \approx 10^{-15}$ m; Größe des Atoms $r_A \approx 10^{-10}$ m; Größe eines Fußballs $R \approx 30$ cm

4.5 Radioaktivität *(radioactivity)*

1896 entdeckte Antoine Henri Becquerel[1], dass eine uranhältige Substanz eine fotografische Platte schwärzt, dass Uran also eine bis dahin unbekannte Strahlung emittiert. Das Ehepaar Curie interessierte sich daraufhin für diese neue Art Strahlung.
Die Entdeckung der Radioaktivität hat der Physik einen starken Impuls gegeben, weil drei Aspekte deutlich der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts widersprochen haben.

1. Radioaktive Erscheinungen wurden im Zusammenhang mit **Umwandlungen chemischer Elemente** beobachtet.

2. Radioaktive Vorgänge setzen Energie frei, deren Quelle die klassische Physik nicht erklären kann. Erst in der Relativitätstheorie ist die **Umwandelbarkeit von Materie in Strahlung** enthalten.

3. Der Zerfall eines Atomkerns ist ein spontaner Prozess. Der genaue Zeitpunkt des Zerfalls eines einzelnen Kerns ist nicht berechenbar. **Spontanes Verhalten** ist innerhalb der klassischen Physik nicht vorgesehen; es ist aber ein wesentlicher Pfeiler der Quantenphysik.

Abb. 69.1 *ANTOINE BECQUEREL*

[1] ANTOINE HENRI BECQUEREL (1852, Paris – 1891, Le Croisic, Bretagne) Für seine Entdeckung der Radioaktivität erhielt er, gemeinsam mit dem Ehepaar CURIE, 1903 den Nobelpreis für Physik.

4.5.1 Das Zerfallsgesetz *(law of decay)*

Von den mehr als 2 700 bekannten Atomkernen sind nur 268 stabil. Die restlichen sind radioaktiv. Ihre Kerne nennt man **Radionuklide**. Das Wesen der Radioaktivität besteht darin, dass einzelne Atomkerne spontan (= ohne äußeren Anlass), Strahlung aussenden und in andere Nuklide zerfallen. Wir haben keine Möglichkeit vorherzusagen, welcher Kern wann zerfällt. Jeder Kern eines bestimmten Isotops kann mit der gleichen Wahrscheinlichkeit zerfallen. Aber wir können bei Vorliegen einer größeren Menge einer radioaktiven Substanz vorher-sagen, wie viele Kerne pro Zeitdifferenz zerfallen werden.

Beim Zerfall einer instabilen Substanz ist die Anzahl ΔN der Atome, die in einer bestimmten Zeitspanne Δt zerfallen, proportional zur Zahl N der Atome und zur Zeitspanne Δt:

$\Delta N \sim N \cdot \Delta t$ oder als Differentialgleichung: $dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$.

Abb. 70.1 *Das Ehepaar PIERRE und MARIE CURIE in ihrem Labor* [1]

Abb. 70.2 *In der obigen Zerfallskurve ist die Abhängigkeit der Anzahl der instabilen Teilchen von der Zeit dargestellt.*

Abb. 70.3 *Im Diagramm sind die Zerfallskurven für ^{131}J ($T_{1/2}$ = 8,05 d) und ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,1 a) eingetragen*

Merk & Würdig

Zerfallsgesetz
$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Halbwertzeit
$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Aktivität
$A(t) = \lambda \cdot N(t)$

N(t) … Anzahl der Teilchen zum Zeitpunkt t, *[N(t)] = 1*
N_0 … Anzahl der ursprünglichen Teilchen, *$[N_0] = 1$*
λ … Zerfallskonstante, *[λ] = 1/s*
t … Zeit, *[t] = s*
A … Aktivität, *[A] = Bq*

Mit Hilfe der Differenzialrechnung erhält man das Zerfallsgesetz:

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Die Anzahl der Kerne nimmt exponentiell ab.

Eine wichtige Größe ist die **Halbwertszeit $T_{1/2}$** *(half-life)*. Sie gibt die Zeit an, in der die Hälfte des ursprünglich vorhandenen Materials zerfällt. Für die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gilt:

$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$. λ … **Zerfallskonstante**

Die Halbwertszeit kann zwischen Bruchteilen von Sekunden (^{17}N: $T_{1/2}$ = 0,2 s) und Milliarden Jahren (^{238}U: $T_{1/2} = 4 \cdot 10^9$ a) schwanken.

Die **Anzahl der Zerfälle pro Sekunde** *(decay rate)* heißt **Aktivität A** *(activity)*. Sie wird in **Becquerel** (Bq) angegeben.

1 Bq entspricht einem Zerfall pro Sekunde [2]. 1 Bq = 1 s^{-1}
Stoffe mit kurzer Halbwertzeit haben eine höhere Aktivität als Stoffe mit langer Halbwertzeit (bei gleicher Masse).

[1] Das Ehepaar experimentierte mit Pechblenderesten, Rückstände vom Uranbergbau, und entdeckte dabei die Elemente Polonium und Radium. Die Pechblendereste erhielten sie aus Joachimsthal, im heutigen Tschechien gelegen, das zu dieser Zeit zur Österreichisch-Ungarischen Monarchie gehörte. (Damals war Österreich eine „Urangroßmacht".)

[2] Häufig wird dafür noch die veraltete Einheit Curie verwendet. Es gilt: 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq. (Dies ist die Aktivität von 1 g Radium.)

Aktivität A (in Becquerel) von Quellen ionisierender Strahlung

Anwendungsbereiche	A (Bq)	Beispiele
Militär		Spaltprodukte bei Explosion von Kernwaffen
Kernkraftwerke, Raumfahrt, Industrie		radioaktives Inventar eines Kernreaktors
	10^{20}	
		Tschernobylunfall: freigesetzte Aktivität
		Geräte zur Sterilisierung von Lebensmitteln
	10^{15}	
Medizin		^{60}Co-Bestrahlungsgerät in der Krebsbehandlung
	10^{10}	1 g Radium
		^{131}I, Bestrahlung der Schildrüse zur Behandlung
		^{131}I, Schildrüsenuntersuchung
	10^{5}	^{40}K im menschlichen Körper
Forschung; Umwelt		Grenzwerte der zulässigen Aktivität von 1 l bzw. 1 kg eines Lebensmittels Belastung von Lebensmittel je kg

Abb. 71.1

Beispiel 4.4

Beim Unfall von Tschernobyl soll das freigesetzte ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,2 a) schätzungsweise eine Aktivität von $2{,}22 \cdot 10^{17}$ Bq gehabt haben. Welcher Masse entspricht das?

Wir kombinieren die Gleichungen $A = \lambda \cdot N$ und $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ und erhalten

$$N = \frac{A \cdot T_{1/2}}{\ln 2} \qquad N = \frac{22{,}2 \cdot 10^{17}\ \text{Bq} \cdot (30{,}2 \cdot 365 \cdot 86\,400\ \text{s})}{\ln 2} = \mathbf{3 \cdot 10^{27}}$$

Ein Mol ^{137}Cs hat eine Masse von 137 g, und in einem Mol sind $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Teilchen enthalten.
Eine Schlussrechnung ergibt, dass etwa $5 \cdot 10^3$ mol ^{137}Cs freigesetzt wurden.

$m_{Cs} = 137\ \text{g/mol} \cdot 5 \cdot 10^3\ \text{mol} = \mathbf{694 \cdot 10^3\ g}$

Es sind cirka **700 kg ^{137}Cs** entwichen.

Beispiel 4.5

Von einer Probe waren bei Beobachtungsbeginn 3 g vorhanden, 2 Tage später nur mehr 1,88 g.
Wie groß ist die Halbwertszeit?

Wir setzen die gegebenen Werte in das Zerfallsgesetz ein:

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow 1{,}88\ \text{g} = 3\ \text{g} \cdot e^{-2d \cdot \lambda} \Rightarrow \ln \frac{1{,}88}{3} = -2\ \text{d} \cdot \lambda \Rightarrow \lambda = 0{,}234\ 1/\text{d}$

Da $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ folgt $T_{1/2} = \mathbf{2{,}97\ d}$

Beispiel 4.6

Man weiß, dass eine Probe aus Radium $25 \cdot 10^6$ Atome enthält.
Wie viel Atome zerfallen innerhalb eines Tages, wenn die Halbwertszeit 1 620 Jahre beträgt?

Man berechnet sich zuerst die Zerfallskonstante λ: $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-1620\,t} = \ln \cdot \left(\frac{1}{2}\right) = -1\,620\,\lambda \Rightarrow \lambda = 4{,}3 \cdot 10^{-4}\ 1/a$$

Mit diesem Wert berechnen wir uns N(t) nach 1 Tag $= \frac{1}{365}$ Jahre (wegen der Einheit von λ).

$$N_1 = 25 \cdot 10^6 \cdot e^{-4{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{365}} = 250 \cdot 10^3$$

Innerhalb eines Tages zerfallen etwa $N_0 - N_1 =$ **30 Ra-Atome**.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du dein Wissen über das Zerfallsgesetz.

Ü 4.9 Nach der Tschernobyl-Katastrophe mussten in Österreich ca. 2 000 t durch ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ a) verstrahlte Molke vernichtet werden. Die Aktivität betrug etwa 1,2 kBq/kg.

a) Wie viel Cs war in der Molke?

b) Welchem Volumen entspricht das? Wie groß wäre eine Seitenkante eines Würfels?

Ü 4.10 *The decay constant of ^{46}Ar is 0,0835 s^{-1}. How great is its half life?*

Ü 4.11 Die Halbwertzeit ist jene Zeit …

a) in der alle Atomkerne zerfallen sind.

b) die nie größer als 1,5 Jahre sein darf.

c) in der die Hälfte aller Atomkerne zerfallen sind.

d) während der die Aktivität am größten ist.

Merk & Würdig

Beim α-Zerfall wird die Ordnungszahl um 2 erniedrigt.

$${}^{A}_{Z}X \Rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

Abb. 72.1 *In einer Nuklidkarte „wandert" ein α-Strahler um 2 Plätze nach links und zwei Plätze nach unten.*

4.5.2 Der Alpha-Zerfall *(alpha decay)*[1]

Der Alpha-Zerfall ist gekennzeichnet durch die Umwandlung eines Atomkerns in einen anderen unter Abgabe eines **Alpha-Teilchens**. Ein Alpha-Teilchen entspricht einem Heliumatomkern ^4He:

$^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + \alpha$ oder $^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + {}^{4}He$

Allgemein kann man schreiben: ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$

Wir bezeichnen dabei den ^{238}U- bzw. ${}^{A}_{Z}X$-Kern als **Mutterkern** *(parent)* und den neu entstandenen ^{234}Th- bzw. ${}^{A-4}_{Z-2}Y$-Kern als **Tochterkern** *(daughter)*.

Das „Entkommen" eines α-Teilchens aus dem Urankern kann nur mit Hilfe des **Tunneleffekts** **(Kapitel 3.3.3)** erklärt werden. α-Teilchen sind besonders stabile Kernbausteine. Nachdem sie ihre Energie abgegeben haben, verhalten sie sich wie He-Atome.

Der Anteil an He in der Atmosphäre stammt aus dieser Quelle.

[1] Die Bezeichnung α-, β- und γ-Strahlung stammt von ERNEST RUTHERFORD und wurde beibehalten.

Beispiel 4.7

Wie groß ist die frei werdende Energie beim Zerfall $^{239}Pu \rightarrow {}^{235}U + {}^{4}He$?

Die freigesetzte Energie entspricht dem Massendefekt Δm.

$m_{Pu} = 239{,}052$ u $\quad m_U = 235{,}044$ u $\quad m_{He} = 4{,}003$ u

$\Delta m = m_{Pu} - (m_U + m_{He}) = 239{,}052\ u - (235{,}044\ u + 4{,}003\ u) = 0{,}005\ u$

Mit der Gleichung $E = \Delta m c_0$ und $1\ u = 931{,}5\ MeV/c_0^2$ erhalten wir:

$E = 0{,}005 \cdot (931{,}5\ MeV/c_0^2) \cdot c_0^2 = 4{,}657\ MeV$

Beim Zerfall eines Pu-Kerns werden **4,7 MeV** frei.

4.5.3 Der Beta-Zerfall *(beta decay)*

Emittiert ein Atomkern ein Elektron oder ein Positron, so spricht man vom Beta-Zerfall. Das emittierte Elektron bzw. Positron wird durch die Umwandlung eines Neutrons oder Protons erzeugt:

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ Man spricht vom β^--Zerfall. $\bar{\nu}_e$ … Antineutrino

$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ Man spricht vom β^+-Zerfall. ν_e … Neutrino

Beim β^--Zerfall muss ein neues Proton im Tochterkern gegen die Coulomb-Abstoßung der anderen Protonen in den Kern eingebaut werden. Dazu muss eine Energie E aufgewendet werden.

Beim Beta-Zerfall kommt es zu einer **Elementumwandlung**, aber nicht zu einer Änderung der Massenzahl.

Merk & Würdig

Beim β^--Zerfall wird die Ordnungszahl um 1 erhöht.

${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}_e$

Beim β^+-Zerfall wird die Ordnungszahl um 1 erniedrigt.

${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}_e$

Abb. 73.1 *β^+- und β^--Zerfall*

4.5.4 Gamma-Strahlung *(gamma ray)*

Nach einem α- oder β-Zerfall verbleibt der Tochterkern manchmal noch in einem **angeregten** Zustand. Diese Energie wird durch Aussendung **elektromagnetischer Strahlung**, der **Gammastrahlung (γ-Strahlung)**, abgebaut. Es findet **keine Kernumwandlung** statt. Trotzdem spricht man von einem Zerfall. Der Kern „zerfällt" von einem Kern höherer Energie in einen Kern niedrigerer Energie. Die Position eines Gamma-Strahlers ändert sich in einer Nuklidkarte nicht.

Übungen

Mit den folgenden Übungen kannst du deine Kenntnisse über Zerfälle überprüfen. Für Ü 4.14 und Ü 4.15 benütze das Periodensystem von Band 2, Seite 171

Ü 4.12 Bestimme, in welchen Tochterkern ^{235}U-Kerne unter Abgabe eines Alpha-Teilchens zerfallen?

Ü 4.13 Ergänze folgende Kernreaktionen:

a) ${}^{226}_{88}Ra \rightarrow$ ____________ $+ {}^{4}_{2}He$

b) ${}^{10}_{5}B + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C +$ ____________

Ü 4.14 Alchemisten versuchten im Mittelalter vergeblich, den Stein der Weisen[1] zu erhalten. Warum ist es ihnen nicht gelungen?

Ü 4.15 Welche der Aussagen sind korrekt?

a) Beim Alpha-Zerfall wird ein doppelt geladener Atomkern emittiert.

b) Bei einem radioaktiven Zerfall zerfällt das gesamte Atom.

c) Beta-Teilchen sind die Elektronen der Hülle.

d) Alpha-Teilchen bestehen aus vier Nukleonen.

e) Nach dem Emittieren von Alpha- und Betateilchen liegt ein anderes Element vor.

f) Die Ordnungszahl ändert sich bei einem Zerfall nicht.

[1] Man glaubte, dass Gegenstände zu Gold werden, wenn man sie mit dem Stein berührt.

4.5.5 Strahlendosimetrie *(dosimetry)*

Auf die Dosis kommt es an!

Ionisierende Strahlung[1] tritt in Wechselwirkung mit der Umgebung. Vor allem die Wirkung auf biologisches Gewebe ist von großem Interesse. Diese Wirkung wird mit den folgenden Größen beschrieben:

a) Energiedosis D

Jeder Körper nimmt bei der Bestrahlung Energie, die **Strahlungsenergie** *(radiaton energy)*, auf. Auf die Art des Körpers wird dabei nicht Rücksicht genommen. Die Energiedosis ist die pro Kilogramm Masse aufgenommene Energiemenge.

$D = \frac{E}{m} \Rightarrow [D] = J/kg$ = Gray, abgek. Gy[2]

b) Ionendosis J

Da die biologische Wirkung ionisierender Strahlung von der Bildung von Ionen im bestrahlten Gewebe abhängt, ist das Ionisationsvermögen der Strahlung ein wichtiges Maß für ihre Schädlichkeit. Dies kommt in der **Ionendosis** zum Ausdruck. Sie ist vom bestrahlten Material oder Organ abhängig. Sie ist der Betrag der elektrischen Ladung, die pro Kilogramm des bestrahlten Körpers erzeugt wird.

$J = \frac{Q}{m} \Rightarrow [J] = C/kg$

c) Äquivalenzdosis D_q

Die biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen wird schließlich durch die Strahlungsart beeinflusst. Deshalb wurden für die Strahlungsarten Erfahrungswerte für ihre Gefährlichkeit ermittelt. Jede Strahlungsart erhält einen bestimmten **Qualitätsfaktor RBW** (**r**elative **b**iologische **W**irkung). Multipliziert man die Energiedosis mit dem Qualitätsfaktor, so erhält man ein Maß für die biologische Wirksamkeit der Strahlung. Dieses Maß wird Äquivalenzdosis genannt.

Es gilt: **Äquivalenzdosis** = Energiedosis × Qualitätsfaktor; $\mathbf{D_q = D \cdot RBW}$

Die Einheit J/kg = Sievert, abgek.Sv[3]

Merk & Würdig

Energiedosis $\mathbf{D = \frac{E}{m}}$

D … Energiedosis; *[D] = Gy*
E … absorbierte Energie; *[E] = J*
m … absorbierende Masse; *[m] = kg*

1 Gy ist die **Energiedosis** einer ionisierenden Strahlung. Dabei wird einem Körper von 1 kg Masse die Energie von 1 J zugeführt.

Ionendosis $\mathbf{J = \frac{Q}{m}}$

J … Ionendosis, *[J] = C/kg*
Q … erzeugte Ladung; *[Q] = C*
m … Masse , *[m] = kg*

1 C/kg ist die Dosis einer ionisierenden Strahlung, die in 1 kg Masse Ladungen Ion von 1 C erzeugt.

Äquivalenzdosis $\mathbf{D_q = D \cdot RBW}$

$\mathbf{[D_q] = \frac{J}{kg} = Sv}$

Strahlungsart	RBW
Röntgenstrahlung	1
γ-Strahlung	1
β-Strahlung	1
Langsame Neutronen	3
Schnelle Neutronen	10
α-Strahlung	20

Tab. 74.1 *Qualitätsfaktor*

Übungen

Ü 4.18 Interpretiere das Diagramm in **Abb. 74.1** aus einem medizinischen Werk über Tumorbekämpfung.

Ü.4.19 Eine der häufigsten Todesursachen sind Tumore. Strahlentherapie ist eine übliche Behandlungsmethode.

Abb. 74.1 *Erwünschtes Profil*

Abb. 74.2 *Protonentherapie*

Abb. 74.3 *Photonentherapie*

Abb. 74.4 *Kohlenstoffionentherapie*

Abb. 74.5

In Wiener Neustadt entsteht derzeit eines von vier Zentren auf der Erde für Protonen- und Kohlenstoffionentherapie: **MedAustron**. Ab 2015 sollen jährlich bis zu 1500 Patienten bestrahlt werden. Als Vorteil sieht man die genauere Platzierung der Bestrahlung und damit eine geringere Strahlenbelastung des gesunden Gewebes.

a) Welche Bedeutung haben die Farben blau und rot in den obigen Abbildungen?
b) Interpretiere die **Abb. 74.2**.
c) Welche Vorteile bieten die Protonen- und die Kohlenstoffionentherapie gegenüber der Photonentherapie?
d) Was ist der Unterschied zu den bisherigen Methoden?
e) Welche Tumore konnten in der Vergangenheit nicht behandelt werden und warum?

[1] Die Bezeichnung „Radioaktivität" wird durch den Begriff **„ionisierende Strahlung"** ersetzt, um auch γ-, Röntgen-und Neuntronenstrahlung mit einbeziehen zu können, die aus anderen Quellen stammen können.
[2] Benannt nach dem englischen Physiker und Radiologen LOUIS HAROLD GRAY (1905 – 1965)
[3] Benannt nach dem schwedischen Physiker ROLF SIEVERT (1896 – 1966)

4.5.6 Strahlenexposition *(radiation exposure)*

Wir sind schon immer einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt: der **terrestrischen Strahlung** und der **Höhenstrahlung**. Die terrestrische Strahlenbelastung und die Belastung durch kosmische Höhenstrahlung bezeichnen wir zusammen als **natürliche Strahlenexposition** (*natural background exposure*). Zusätzlich gibt es seit etwa 100 Jahren auch die künstliche Strahlenexposition durch die künstliche Radioaktivität.

Abb. 75.1 *Anteile der mittleren natürlichen und künstlichen Strahlenexposition für einen mitteleuropäischen Bewohner*

Abb. 75.2 *Die Uran-Actinium-Reihe beginnt mit ^{235}U ($T_{1/2}$ = 7,1 ·10⁸ a) und endet mit dem stabilen Bleiisotop ^{207}Pb. Die kurzlebigen Elemente dieser Reihe sind Ursache für die terrestrische Strahlung.*

Abb. 75.3 ***Natürliche Strahlenexposition*** *(= Strahlenbelastung) in Österreich (pro Kilogramm eines Stoffes absorbierte Strahlungsenergie): Während die kosmische Höhenstrahlung für Orte in ganz Österreich nahezu gleich ist, hängt die terrestrische Strahlung von der Gegend ab. In Bergwerken, auf Granitpflaster oder in schlecht gelüfteten Gebäuden tritt ebenfalls eine höhere Strahlung auf.*

Terrestrische Strahlung

durch

1) Isotope der natürlichen **Zerfallsreihen**:
Einige Radionuklide, z. B. ^{235}U, zerfallen nicht unmittelbar in ein stabiles, nicht-radioaktives Nuklid, sondern durchlaufen natürliche Zerfallsreihen **(Abb. 75.2)**. Es entstehen zahlreiche, ihrerseits radioaktive Atomkerne.

2) Isotope, die nicht Tochterkerne einer Zerfallsreihe sind, aber aufgrund ihrer großen **Halbwertszeit** seit der Erdentstehung existieren. Ein typisches Beispiel ist ^{40}K. Seine Halbwertszeit beträgt $1{,}25 \cdot 10^9$ Jahre.

3) Radionuklide, die durch **Reaktionen der Höhenstrahlung** mit den Luftmolekülen der Atmosphäre entstehen, z. B. ^{14}C.

Kosmische Höhenstrahlung *(cosmic radiation)*

1912/13 entdeckte Viktor Hess[1] eine weitere ionisierende, sehr durchdringende Strahlung, die (primäre) kosmische Höhenstrahlung. Vor allem schnelle Protonen treffen von allen Seiten auf die Erde. Wenn die kosmische Strahlung auf die oberen Schichten der Atmosphäre trifft, dann entstehen durch Zusammenstöße mit Luftteilchen weitere Teilchen, z. B. Neutronen. Solche Neutronen können weitere Kernreaktionen eingehen und zur Bildung radioaktiver Nuklide führen, z. B. Bildung des radioaktiven Nuklids ^{14}C:

$^{14}N + n \rightarrow ^{14}C + ^{1}H$

Die natürliche äußere Strahlenbelastung beträgt in Österreich im Mittel 0,78 mSv/a. Die kosmische Höhenstrahlung trägt dazu mit 0,035 mSv/a bei.

Künstliche Radioaktivität *(artificial radiation)*

Zusätzlich zur natürlichen Strahlenbelastung existiert noch eine Exposition durch künstliche Radioaktivität. Sie stammt aus Strahlenquellen, die der Mensch verursacht. Die in der **Tabelle 76.1** angegeben Werte sind Durchschnittswerte, die über alle Österreicher gemittelt wurden. Beispielsweise kann häufiges Röntgenisieren den angegebenen Wert übersteigen. Im Gegensatz zur natürlichen Belastung, die für jeden fast gleich ist, ist die Belastung durch künstliche Radioaktivität individuell verschieden. Medizinisches Personal für Röntgenuntersuchungen oder Arbeiter/innen in Kernkraftwerken sind berufsbedingt höheren Belastungen ausgesetzt als Durchschnittsbürger. Für sie sind höhere Grenzwerte festgesetzt als für den Rest der Bevölkerung.

Quelle	Dosis (in mSv/a)
Medizin	2,0
Tschernobyl	0,01
Kernwaffentests	0,005
Flugreisen	0,005

Tab. 76.1 *Durchschnittliche Strahlenbelastung (Äquivalenzdosis)*

Übungen

Ü 4.18 Verwende zur Beschreibung der **Abb. 76.2** folgende Wörter:

reagieren – aufgenommen – stirbt – kosmische Strahlung – erzeugt – Stickstoffatomen – Neutronen – entstehen – zerfallen

Abb. 76.1 *Die Bildung von ^{14}C in der Atmosphäre und den Eintritt in die Biosphäre*

Abb. 76.2 *VICTOR FRANZ HESS*

[1] VICTOR FRANZ HESS (1883 bei Peggau – 1964 Mount Vernon, N.Y.), österr. Physiker. Bei seinen Ballonaufstiegen bis in eine Höhe von 5 500 m entdeckte er die Höhenstrahlung. Für deren Entdeckung erhielt er 1936 den Nobelpreis. Aus politischen Gründen emigrierte er 1938 in die USA.

4.5.7 Gesundheitliche Auswirkungen ionisierender Strahlung

(health effects of ionising radiation)

Die Wirkung ionisierender Strahlung beruht darauf, dass die Wassermoleküle den Hauptteil der Strahlungsenergie aufnehmen und dissoziieren. Zwei Strahlungswirkungen werden wir genauer beschreiben:

- die Radiolyse des Wassers und
- die direkten Schädigungen des Zellkerns.

1) Radiolyse des Wassers

Wassermoleküle werden bei der Bestrahlung in freie Elektronen, H-Atome und OH^--Gruppen zerlegt. Weiters entstehen H_2 und H_2O_2-Moleküle, deren chemische Wirksamkeit gering ist. Die freien Elektronen, H-Atome und OH^--Gruppen reagieren jedoch heftig mit ihrer Umgebung und verändern beispielsweise die funktionellen Gruppen der organischen Moleküle, die Bindungsverhältnisse zwischen den Atomen oder die Wasserstoffbrückenbindungen.

2) Direkte Schädigungen des Zellkerns

Durch ionisierende Strahlung kann es bei der DNA (Desoxyribonukleinsäure, Träger der Erbsubstanz, **Kapitel 18.3**) zu einem Bruch der beiden Stränge des Riesenmoleküls kommen. Bleibt ein Strang intakt, so vermag die Zelle den Schaden selbständig zu beheben. Werden beide Stränge durchtrennt, ist die selbständige Reparatur der DNA ausgeschlossen. Die Folgen sind Veränderungen der DNA oder das Absterben der Zelle.

Die zellbildenden Organe des menschlichen Körpers sind deshalb am strahlenempfindlichsten. Dies betrifft vor allem die Keimdrüsen, das Knochenmark, die Lymphknoten und die Schleimhäute der Luftwege und des Magen-Darm-Traktes. Embryos und Kleinkinder werden als besonders gefährdet angesehen.

Je nach Dosis sind drei Klassen von Strahlenschäden zu unterscheiden:

Akute Schäden des menschlichen Körpers treten unmittelbar bei Bestrahlung auf („Strahlensyndrom"). Spätfolgen von Bestrahlungen (z. B. erhöhte Risiken für Krebs) heißen **latente Schäden**. Darüber hinaus können **genetische Schäden** an der Nachkommenschaft auftreten (Erbschäden).

Für die Auswirkungen ist entscheidend, ob nur ein Teil des menschlichen Körpers bestrahlt wurde (medizinische Diagnostik, Therapie) oder ob eine Ganzkörperbestrahlung erfolgte. So verkraftet der menschliche Körper eine lokale Einzeldosis bis zu etwa 10 Gy, während eine **Ganzkörperbestrahlung** von 10 Gy absolut tödlich ist.

Strahlenschutz

Wegen der oben beschriebenen gesundheitlichen Schäden ionisierender Strahlung ist es erforderlich, sich vor ihr zu schützen.

Man unterscheidet grob

- **Schutz vor äußerer Strahlung**
  Wegen der geringen Reichweite der Alpha- und Beta-Strahlung **(Tab. 77.1)** genügt oft Straßenkleidung; sonst Schutzkleidung tragen (Bleiweste bei Röntgenuntersuchungen); bei Radon hilft häufiges Lüften der Räume.
- **Schutz vor Verunreinigung** von Personen und Stoffen, Dekontamination durch Waschen, Schutzkleidung.
- **Schutz vor Inkorporation**
  Inkorporation ist die Aufnahme von Radionukliden mit der Nahrung oder der Atmung; eine Inkorporation ist auf jeden Fall zu vermeiden, da dann kein Schutz mehr möglich ist. Man muss daher bereits vorher Schutzmaßnahmen ergreifen: Waschen der Lebensmittel, Mundschutz, Jodblockade der Schilddrüse durch Jodtabletten.

Weitere einfache Maßnahmen sind Abstand halten und (bei Katastrophen): Fenster dicht verschließen; im Extremfall gibt es nur mehr die Evakuierung.

Extreme Maßnahmen sind nur im Falle einer nuklearen Katastrophe, z. B. Tschernobyl oder Fukushima **(Kapitel 4.6.4)**, zu beachten.

		in Luft	in Gewebe
α	1 MeV	0,32 cm	4 µm
	4 MeV	2,6 cm	31 µm
	8 MeV	7,3 cm	91 µm
β	0,2 MeV	0,4 m	0,04 cm
	1 MeV	4 m	0,4 cm
	2 MeV	8,7 m	1 cm
γ		∞	$\sim 1/r^2$

Tab. 77.1 *Reichweite ionisierender Strahlung*

Strahlenwirkung	
< 0,5	Geringe (vorübergehende) Blutbildveränderungen, Schwächung des Immunsystems
bis 1,2	Vorübergehender „Strahlenkater" (Müdigkeit, Übelkeit, Erbrechen) in 10 % der Fälle
4 – 5	50 % Todesfälle innerhalb von 30 Tagen, Erholung der Überlebenden nach 6 Monaten. Überlebende weisen latente Schäden auf (verkürzte Lebenserwartung, erhöhtes Krebsrisiko, Leukämie, Wachstumsstörungen bei Kindern)
bis 7,5	Letale Dosis – 100 % Todesfälle. Der Tod tritt innerhalb weniger Wochen ein.
> 50	Der Tod tritt unmittelbar bei Bestrahlung ein.

Tab. 77.2 *Überblick über die Strahlenwirkung bei einer Ganzkörperbestrahlung (in Sv)*

§ 9 Jede Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper ist … so niedrig wie möglich zu halten; jede unnötige Einwirkung ist zu vermeiden.
Strahlenschutzverordnung vom 18. Februar1972

Dekontamination
ist die Entfernung jeglicher gefährlicher Substanzen, speziell von Radionuklide. Bei oberflächlicher Verstrahlung ist Waschen die einzige Möglichkeit.

Übungen

Bei dieser Übung lernst du, kritisch mit Informationen umzugehen.

Ü 4.19 »Effektive Halbwertzeit: Wie nahezu alle Substanzen unterliegen auch die Radioisotope dem Stoffwechsel, und werden ... aus dem Körper ausgeschieden (biologische HWZ). Hinzu kommt die physikalische HWZ der Radioisotope.«

Aus: www.bundesheer.at; ABCAbws/GLAbt

Es gilt:

$$T_{eff} = \frac{T_{phys} \cdot T_{biol}}{T_{phys} + T_{biol}}$$

^{137}Cs: $T_{phys} = 30{,}2$ a; $T_{biol} = 110$ d;

$T_{eff} = 69{,}6$ d errechnet vom österreichischen Bundesheer

$T_{eff} = 109$ d vom Karlsruhe Institut für Technologie

Wer hat richtig gerechnet?

4.6 Energie aus dem Kern *(energy from the nucleus)*

Zwei Prozesse ermöglichen die Energiegewinnung durch Kernreaktionen:

Spaltung von schweren Kernen in leichtere Kerne (**Fission**) und Verschmelzung von zwei leichten Kernen, um Atomkerne zu erzeugen, die schwerer sind (**Fusion**).

In beiden Fällen wird Energie aufgrund des **Massendefekts** **(Kapitel 4.4)** freigesetzt.

4.6.1 Kernspaltung *(nuclear fission)*

Unter Kernspaltung versteht man den durch Absorption eines Neutrons verursachten Zerfall eines schweren Atomkerns in meist zwei Bruchstücke. Dabei wird Bindungsenergie der Nukleonen frei.

Hahn[1] und Strassmann[2] bestrahlten 1938 Uran mit Neutronen, um Atomkerne zu finden, die schwerer sind als die von Uran. Statt der erwarteten Transurane entdeckten sie unter der Mithilfe der Physikerin Lise Meitner[3], dass es ihnen gelungen war, Uran in zwei Kerne zu spalten. Die folgende Gleichung stellt nur eine von vielen möglichen Reaktionen dar:

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{145}Ba + {}^{88}Kr + 3\,n$$

Sie ist auch die von Hahn, Meitner und Strassmann gefundene Reaktion. Es wurde bald klar, dass dieser Vorgang sehr viel Energie freisetzt. Mit der Identifizierung der Spaltprodukte begann sozusagen das **Atomzeitalter**.

Bei einer Kernspaltung werden Neutronen freigesetzt. Diese Neutronen werden nun ihrerseits zum Beschuss von Urankernen benutzt, um weitere Urankerne zu spalten. Mit der größer werdenden Zahl von Spaltneutronen wächst auch die Zahl der gespaltenen Kerne. Dies wird **Kettenreaktion** *(chain reaction)* genannt.

Ausbeute in % — Massenzahl

Abb. 78.1 *Die Urankerne spalten sich zum größten Teil in zwei Bruchstücke, die ungleich schwer sind. Die Maxima liegen um Barium und Krypton.*

Abb. 78.2 *Von links: Fritz Strassmann, Lise Meitner und Otto Hahn*

[1] OTTO HAHN (1879 Frankfurt am Main – 1968, Göttingen) , deutscher Chemiker. Gemeinsam mit LISE MEITNER arbeitete er an dem berühmt gewordenen Versuch, für den er 1944 den Nobelpreis für Chemie erhielt. Nach dem 2. Weltkrieg trat er vehement gegen die atomare Rüstung ein.

[2] FRITZ STRASSMAN (1902 Boppard am Rhein – 1980 Mainz) , deutscher Chemiker. Er war als Chemiker Mitarbeiter im Team von HAHN und MEITNER. Ihm war die Anerkennung durch den Nobelpreis verwehrt.

[3] LISE MEITNER (1878 Wien – 1968 Cambridge), österreichische Physikerin. Sie arbeitete auf dem Gebiet der Radioaktivität und Kernphysik. Dabei entdeckte sie das Element Protaktinium. Sie wies nach, dass erst nach einer Kernumwandlung γ-Strahlung emittiert wird. Mit HAHN und STRASSMANN arbeitete sie am Projekt der Transurane. Aus „rassischen" Gründen musste sie kurz vor der Entdeckung der Kernspaltung Deutschland verlassen. Aus dem schwedischen Exil korrespondierte sie weiter mit den beiden. Wegen ihrer Leistungen wurde sie weltweit geehrt. Der Nobelpreis wurde ihr aber – aus nicht näher bekannten Gründen – verwehrt.

Abb. 79.1 **Links:** *In diesem mechanischen Modell stellen die Mausefallen die Atomkerne und die Bälle die Neutronen dar.* **Mitte:** *Die Reaktion beginnt.* **Rechts:** *Die Kettenreaktion ist in vollem Gange.*

Tipp: *Du findest solche Filme im Internet!*

Merk & Würdig

Neutronen induzierte Kernspaltung

Die Spaltung eines Atomkerns wird durch ein Neutron ausgelöst. Neben der Bindungsenergie werden bei der Spaltung auch 2 bis 3 Neutronen frei.

Es müssen jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein, damit eine Kettenreaktion stattfinden kann:

1. Bedingung: Das notwendige Spaltmaterial ist ^{235}U. Es kommt allerdings nur zu 0,7 Prozent im Natururan vor. Die restlichen 99,3 % sind ^{238}U. Natururan muss für Kernreaktoren auf etwa 4 % angereichert werden. Diese **Anreicherung** *(uranium enrichment)* ist sehr (energie-) aufwendig.

2. Bedingung: Die bei der Spaltung frei werdenden Neutronen sind sehr schnell. Sie müssen mittels **Moderatoren** (*moderators*, z. B. Wasser oder Graphit) abgebremst werden, da nur langsame, sogenannte thermische Neutronen in der Lage sind, die Urankerne zu spalten.

3. Bedingung: Es muss genügend spaltbares Material vorhanden sein, damit die Neutronen nicht aus dem Material heraus fliegen, bevor sie eine neue Spaltung auslösen können. Je mehr spaltbares Material vorliegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Neutronen auf einen Kern treffen und ihn spalten. Ab einer bestimmten Menge bewirken die frei gewordenen Neutronen sicher weitere Kernzerfälle: Diese Masse wird **kritische Masse** (*critical mass*, für ^{235}U etwa 50 kg) genannt.

1. Neutronen-generation
2. Neutronen-generation
3. Neutronen-generation

Abb. 79.2 ***Kettenreaktion*** *von ^{235}U; der Vorgang läuft lawinenartig ab und es werden in kürzester Zeit große Mengen an Energie freigesetzt.*

Beispiel 4.8

Energiebilanz einer Kernspaltung

Wird ein Urankern ^{235}U in zwei leichtere Kerne (Massenzahlen 132 und 100) gespalten, so gilt für die Bindungsenergie pro Nukleon:

		Bindungsenergie pro Nukleon	Energiegewinn pro Nukleon
Mutterkern	1 A = 235	7,5 MeV	
Tochterkerne	A = 132	8,2 MeV	0,7 MeV
	A = 100	8,4 MeV	0,9 MeV

Tab. 79.1

Bei dieser Spaltung von einem Urankern wird somit etwa die Energie von $132 \cdot 0{,}7$ MeV + $100 \cdot 0{,}9$ MeV ≈ 200 MeV frei.

Wir berechnen nun den „Heizwert" von 1 kg Uran:

235 kg U enthalten $6 \cdot 10^{26}$ Kerne ⇒ 1 kg U enthält $2{,}6 \cdot 10^{24}$ Kerne

Pro Kern erwarten wir einen Energiegewinn von etwa 200 MeV.

Daher erhalten wir bei vollständiger Spaltung von 1 kg Uran $5 \cdot 10^{23}$ eV = $8 \cdot 10^{13}$ J.

Vergleich: 1 kg Heizöl-Leicht hat einen Heizwert von $4 \cdot 10^{7}$ J/kg.

Abb. 79.3 *Historische Darstellung des ersten Reaktors, gebaut 1945 von Enrico Fermi in Chicago*

Übungen

Mit diesen Übungen überprüfst du dein Wissen über die Kernspaltung.

Ü 4.20 $^{235}U + n \Rightarrow {}^{140}Cs + {}^{94}X + 2\,n$ ist eine weitere Möglichkeit der Kernspaltung. Bestimme, um welches chemische Element es sich bei X handelt.

Ü 4.21 Welche der folgenden Aussagen trifft zu:

a) Kernspaltung ist ein spontaner Vorgang.
b) Nur Uran lässt sich von natürlich vorkommenden Elementen „energiegewinnbringend" spalten.
c) Kernspaltung ist künstliche Kernumwandlung.
d) Kernspaltung ist ein durch Absorption von Neutronen ausgelöster Zerfall von schweren Kernen.
e) Bei jedem Spaltvorgang werden 2 bis 3 Neutronen frei.
f) Moderatoren haben die Aufgabe, die Neutronen zu bremsen.

Ü 4.22 Erkläre, warum Neutronen für künstliche Kernumwandlungen günstig sind.

4.6.2 Kernreaktoren *(atomic piles)*

Kernreaktoren dienen zur Erzeugung von radioaktiven Isotopen bzw. Neutronenstrahlen und zur Erzeugung von elektrischer Energie. In Kernreaktoren läuft die Kernspaltung unter weitgehend kontrollierten Bedingungen ab. Die bei der Spaltung frei werdende Bindungsenergie dient als Wärmenergie zur Erzeugung von Wasserdampf. Dieser treibt eine Turbine, mit der ein Generator schließlich elektrischen Strom erzeugen kann. Zahlreiche Sicherheitseinrichtungen sollen das Austreten von radioaktiven Stoffen und das „unkontrollierte Durchgehen" des Reaktors verhindern.

Zwei Typen von Reaktoren werden wir näher beschrieben:

Abb. 80.1 *Prinzipieller Aufbau eines Reaktors*

Druckwasserreaktor *(pressure water reactor)*

Er zählt zu den Leichtwasserreaktoren. Dabei wird das Wasser sowohl als Moderator als auch als Kühlmittel verwendet. Das Kühlwasser steht unter einem Druck von etwa 150 bar. In einem Dampferzeuger gibt dieses etwa 300 °C heiße Wasser die Energie in einem Sekundärkreislauf (etwa 70 bar) ab, mit dessen Dampf eine Turbine betrieben wird.

Schwimmbadreaktor

Der Reaktor der Atominstitute der Universität Wien ist ein Reaktor dieses Typs mit dem Namen TRIGA MARK-II (Training, Research, Isotope Production, General Atomic). Er ist seit 1962 in Betrieb.

Als Brennstoff dient ein Gemisch aus ^{235}U und ^{238}U mit einer Anreicherung von 20 % ^{235}U. Das entspricht einer Beladung von 3,6 kg ^{235}U.

Abb. 80.2 *Aufbau eines Uranbrennstabs*

Abb. 80.3 *Schematischer Aufbau eines Druckwasserreaktors*

Abb. 80.4 *Österreichs einziger Reaktor wird in der Forschung und Lehre eingesetzt.*

4.6.3 Der Kernbrennstoffkreislauf *(nuclear fuel cycle)*

Im Durchschnitt enthält die Erdkruste 4 g Uran pro Tonne. (Das entspricht etwa der Häufigkeit von Blei und Zinn.) Davon sind ca. 99,3 % ^{238}U, der Rest ^{235}U. Vom Erz bis zum Einsatz in einem Kernkraftwerk durchläuft das Uran einige Prozesse.

1) Aufbereitung

Das Uranerz (*yellow cake*, **Abb.81.1**) wird mit Hilfe chemischer Prozesse aufbereitet, sodass es als Mischung aus ^{235}U und ^{238}U vorliegt.

2) Anreicherung

Das reine Uran wird mit Fluor zu UF_6 (Uranhexafluorid), einem Gas umgewandelt, um ^{235}U von ^{238}U zu trennen. Bei den mechanischen Trennverfahren nutzt man den Massenunterschied der U-Isotope. Eine häufig benutzte Methode ist die Gaszentrifuge **(Abb. 81.2)**. Das gasförmige UF_6 strömt in einen rotierenden Zylinder. Wegen der größeren Masse sammelt sich ^{238}U eher an der Zylinderwand, während ^{235}U eher in der Nähe der Rotationsachse bleibt, von wo es abgesaugt wird. Dieser Vorgang wird viele Male wiederholt, bis die gewünschte Anreicherung erreicht ist.

3) Brennelementherstellung

Das Gas UF_6 wird in Uranoxid UO_2 umgewandelt und in Pellets gepresst. Anschließend werden sie in ca. 5 m langen Hüllrohre gefüllt. Diese Einzelstäbe werden zu Brennstabbündel zusammengefasst und für den Einsatz in einem Kernkraftwerk vorbereitet. Dieser Vorgang wird **Assemblieren** genannt.

4) Einsatz im Kernkraftwerk

Das Uran in den Brennstäben wird dem Beschuss von Neutronen ausgesetzt. Das unvermeidlich vorhandene ^{238}U wird dabei nach einem zweimaligen β-Zerfall zu ^{239}Pu „erbrütet" (siehe auch **Risiko 5**):

$$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U + e^- \rightarrow {}^{239}Np + e^- - \rightarrow {}^{239}Pu + e^-$$

Dabei ist ^{239}Pu das erbrütete Plutonium.

5) Wiederaufbereitung und Endlagerung

Die abgebrannten Brennelemente enthalten neben dem erbrüteten Plutonium (siehe **Risiko 4**) auch Spaltprodukte, die nicht in die Umwelt gelangen dürfen. In aufwendigen Prozessen wird das (waffenfähige) Plutonium chemisch getrennt. Der Rest muss für die Endlagerung sicher und hermetisch abgeschlossen werden. Abgebrannte Brennelemente aus zivilen Leistungsreaktoren enthalten noch rund 96 % unverbrauchtes Uran und 1 % Plutonium.

Abb. 81.1 *„Yellow cake", der anschließend in Pellets gepresst wird*

Abb. 81.2 *Gaszentrifuge*

Abb. 81.3 *Brennstabbündel*

4.6.4 Risiken der Kernenergie *(danger of atomic energy)*

Beim Betrieb von Kernkraftwerken treten Sicherheitsrisiken auf, die möglichst gering gehalten werden sollen.

Risiko 1: Ionisierende Strahlung des Reaktorkerns

Bei der Kernspaltung wird ^{235}U in leichtere Kerne zerlegt. Diese Kerne zerfallen zum Teil mit kurzen Halbwertszeiten weiter und senden dabei ionisierende Strahlung aus. Um die frei werdende Neutronen-, α-, β- und γ-Strahlung abzuschirmen, ist der Reaktorkern mit meterdicken Betonwänden umgeben.

Risiko 2: Ausfall der Regelstäbe

Diese werden beim regulären Betrieb so weit herausgezogen, dass die Kettenreaktion nicht aufhört. Bei einem Störfall sollten die Regelstäbe aufgrund der Schwerkraft in das Reaktordruckgefäß fallen.

Abb. 81.4 *Nur der Kühlkreislauf und der Antrieb für die Regelstäbe reichen in das Druckgefäß*

Risiko 3: Ausfall des Kühlsystems

Die frei werdende Spaltenergie wird durch das Kühlwasser abgeführt. Beim Ausfall des Kühlsystems wird der Reaktor abgeschaltet. Weil der weitere Zerfall der Spaltprodukte nicht durch das Einführen der Regelstäbe vollkommen gestoppt werden kann, muss der Reaktorkern auch nach dem Abschalten weiter gekühlt werden. Dazu dient ein Notkühlsystem, das neben dem Hauptkühlsystem einen eigenen Kreislauf bildet.

Risiko 4: Transport der Brennelemente

Der Transport von Brennelementen muss in möglichst sicheren Behältern ausgeführt werden, die auch schweren Unfällen wie Frontalzusammenstößen oder Treibstoffbränden standhalten müssen.

Risiko 5: Wiederaufbereitung von Brennelementen

Durch Neutroneneinfang wird ^{238}U in ^{239}Pu umgewandelt. In Wiederaufbereitungsanlagen wird dieses Plutonium und restliches Uran aus verbrauchtem Spaltmaterial gewonnen und der Rest als radioaktiver Abfall zur vorläufigen Endlagerung vorbereitet.

Risiko 6: Endlagerung des radioaktiven Abfalls

Beim Betrieb von Kernkraftwerken fallen verschieden hoch radioaktiv belastete Abfälle an. Beispielsweise entsteht in den Luftfiltern und bei der Reinigung des Wassers des Kühlkreislaufes schwach radioaktiver Abfall. Solche Abfälle werden beispielsweise mit Bitumen verfestigt und in Stahlfässer eingegossen. Da die Spaltprodukte auch nach dem Abschalten des Reaktors stark radioaktiv sind und eine erhebliche Leistung abgeben, werden die abgebrannten Brennelemente zunächst im Reaktorgebäude in tiefen Wasserbecken zwischengelagert. Für die Endlagerung werden diese hochradioaktiven Abfälle verfestigt und in Stahlfässer gefügt. Als Endlagerstätten sind beispielsweise aufgelassene Bergwerke vorgesehen. Bislang ist – vermutlich weltweit – allerdings noch kein einziges Endlager für hoch radioaktive Abfälle (z. B. Abfälle aus dem Aufbereitungsprozess) im Regelbetrieb.

Abb. 82.1 *Der Behälter CASTOR, mit dem in der BRD Brennelemente auf Bahn und Straße transportiert wird.*

Abb. 82.2 *Die in verglasten Fässern eingeschmolzenen Abfälle (schwach- und mittelaktive) werden zur Endlagerung in Salzstöcken (= aufgelassene Salzbergwerke) aufgeschichtet.*

Merk & Würdig

Radiotoxizität

Sie ist ein Maß für die Gefährlichkeit von Radionukliden. Sie hängt von der Strahlenart, der Energie der Strahlung und der Verweildauer im menschlichen Körper ab. Gemessen wird die Radiotoxizität in Sievert.

Thema & Gesellschaft

1) Die Radiotoxizität des Plutoniums

1940 wurde Plutonium in den USA entdeckt und bis 1942 wurde etwa 1µg hergestellt. In der Natur kommen die Isotope ^{239}Pu ($T_{1/2}$ = 24 000 a) und ^{244}Pu ($T_{1/2}$ = 82 Millionen Jahre) vor. In einem Leichtwasserreaktor werden etwa in einem Jahr 300 kg erbrütet. Man schätzt, dass weltweit bis zu 500 t Pu angefallen sind.

Das in den abgebrannten Brennelementen befindliche Pu wird entweder aufbereitet (z. B. in Frankreich und Japan) oder muss als hoch radioaktiver Abfall endgelagert (z. B. in Deutschland und USA) werden (siehe unten **Problematik der Endlagerung**).

Das aufbereitete Plutonium ist vor allem für die Rüstungsindustrie interessant; dient es doch als Ausgangsstoff für Kernwaffen. Die Bombe, die über Nagasaki abgeworfen wurde, war eine Pu-Bombe **(Kapitel 4.6.5)**. Die zivile Nutzung von Pu in speziellen Reaktoren wurde aus Gründen der Sicherheit eingestellt.

Abb. 83.1 *Die Radiotoxizität abgebrannter Brennelemente wird auf Natururan bezogen.*

2) Die Problematik der Endlagerung

Diese ist in keiner Weise gelöst. Wissenschaftler sind sich weder in Hinsicht auf geeignete Orte noch bezüglich einer sinnvollen Technik einig, obwohl schon seit langem verschiedenste Methoden erforscht und probiert werden.

Schwierigkeiten bereitet dabei die große Halbwertzeit vieler radioaktiver Substanzen und die Abwärme radioaktiver Prozesse. Diese Elemente müssen für Jahrtausende (oder noch länger) vor der Biosphäre abgeschirmt werden.

Ein aktuelles Beispiel aus Deutschland:

Im Endlager in Asse (ein stillgelegtes Salzbergwerk in der Nähe der Stadt Salzgitter) wurden bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts schwach- und mittelradioaktive Abfälle „für die Ewigkeit" untergebracht.

Um die Jahrtausendwende wurden Wassereintritt, erhöhte Strahlungswerte und ein Schrumpfen der Hohlräume festgestellt. Alles Gründe, sich um die Sicherheit der 125 000 gelagerten Fässer sorgen zu machen. Über die bestmögliche Lösung wird diskutiert.

Abb. 83.2

Übungen

Mit diesen Übungen überprüfst du dein Wissen über die Kernspaltung.

Ü 4.23 **Entdeckung des Plutoniums:** Durch den Beschuss von ^{238}U mit Deuteriumkernen entstand zunächst ^{238}Np, das durch Zerfall in ^{238}Pu umgewandelt wurde. Um welchen Zerfall handelt es sich und was wurde emittiert? Stelle die Reaktionsgleichung auf.

Ü 4.24 **a)** Um welche Radiotoxizität (in Sv/t) sind die Spaltprodukte (vor allem Jod und Cäsium) nach einem Menschenleben abgefallen?

b) Wann haben die Spaltprodukte die Radiotoxizität von Natururan erreicht?

Ü 4.25 **a)** Pu hat eine Dichte von ca. 20 t/m³. Berechne das Volumen bzw. die Seitenkante des zugehörigen Würfels des bisher angefallenen Plutoniums von ca. 500 t.

b) Wieso braucht man derartig große Endlagerstätten?

c) Bodenproben haben ergeben, dass durch Kernwaffentests ca. 3 t ^{239}Pu in den Boden gelangt sind. Berechne, wie viel Pu-Atome sich pro 1 m² Erdoberfläche befinden.

Hinweis: Benütze auch die Gleichung $N = \frac{mN_A}{A_r}$; $A_r = 239$

d) Berechne, wie viel Atome nach 100 Jahren noch vorhanden sind.

Ü 4.26 Die lange Halbwertzeit und die große Menge der Radionuklide in den Brennelementen stellen ein großes Problem der Endlagerung dar. Man versucht daher, vor allem die Halbwertzeit mit physikalischen Methoden zu verringern. Derzeit wird *Partitioning & Transmutation* als vielversprechend angesehen: Die Elemente in den Brennstäben werden chemisch getrennt und anschließend dem in **Abb. 84.1** symbolisch für einen Kern gezeigten Vorgang unterworfen.

a) Beschreibe diesen Vorgang am Beispiel Pu und stelle die Reaktionsgleichung auf.

b) **Abb. 84.2** zeigt die Radiotoxizität nach Behandlung der Brennelemente durch Partitioning & Transmutation. Vergleiche **Abb. 84.2** mit **Abb. 83.1**. Wann ist jetzt die Radiotoxizität von Pu wieder auf das Maß von Natururan abgesunken?

c) Überlege, welche Vorteile bzw. Nachteile die Methode bietet.

Abb. 84.1 *Schematische Darstellung der Methode „Partitioning & Transmutation". X steht für Plutonium oder ein anderes Transuran wie Americium oder Curium.*

Abb. 84.2 *Radiotoxizität nach Behandlung der Brennelemente durch „Partitioning & Transmutation"*

Abb. 84.3 *Tschernobyl: Die unmittelbar nach der Katastrophe gebaute Umhüllung wurde „Sarkophag" genannt.*

Trotz aller Sicherheitseinrichtungen ist es in der Vergangenheit in Kernkraftwerken wiederholt zu Störfällen gekommen, die nicht immer beherrscht werden konnten. Fünf Störfälle sollen stellvertretend für alle kurz geschildert werden:

Störfall 1: Windscale, Großbritannien 1957

Bei Wartungsarbeiten begann der Moderator Graphit zu brennen. Der luftgekühlte Reaktor konnte erst durch das Einleiten von Wasser gelöscht und gekühlt werden. Als Folge wurde ^{131}I mit einer Aktivität von wenigstens 10^{15} Bq frei. Millionen Liter Milch wurden ungenießbar, über Gesundheitsschäden der Bevölkerung wird heute noch diskutiert.

Störfall 2: Three Mile Island, Harrisburg, USA 1979

Aufgrund technischer Mängel und Bedienungsfehler geriet der Reaktor außer Kontrolle, der Reaktorkern schmolz. Der Sicherheitsbehälter verhinderte weitgehend ein Austreten von radioaktiv verstrahltem Material.

Störfall 3: Tschernobyl, Ukraine (vormals UdSSR) 1986

Im Rahmen fahrlässiger Versuche geriet der Reaktor außer Kontrolle. Nach der Explosion des Reaktorkerns begann das Moderatormaterial Graphit zu brennen. Gewaltige Mengen an Radioaktivität (≈ 10^{18} Bq) wurden am Unfallort und in weitem Umkreis als radioaktiver Niederschlag frei. In Europa waren aufgrund der Witterung Ukraine, Weißrussland, Österreich, Deutschland und Skandinavien am meisten davon betroffen (vor allem durch ^{131}I und ^{137}Cs). Als Folge der Explosion und der direkten Verstrahlung waren in der näheren Umgebung des Kernkraftwerkes zahlreiche Tote zu beklagen. Über die Langzeitwirkung gibt es verschiedene Auffassungen: Fest zu stehen scheint, dass die Zahl der Krebserkrankungen in der Ukraine und Weißrussland signifikant zugenommen hat.

Die Schätzungen, wie viele Todesopfer die Katastrophe bislang gefordert hat, gehen weit auseinander. Zwischen 50 000 und 500 Opfern schwanken die Angaben. Welche Zahlen stimmen, wird immer wieder heftig diskutiert. Nicht einmal bei den **Liquidatoren** (= Personen, die beim Löschen des Brandes, bei der Evakuierung der Menschen und des Viehs, Bau des Sarkophags, Waschen der Ortschaften, etc., geholfen haben) ist man sich über die Zahl der Toten einig.

Störfall 4: Fukushima, Japan 2011
Nach einem verheerenden Erdbeben schalteten sich die Kraftwerksblöcke vorschriftsmäßig ab. Danach traf ein Tsunami die Küste und setzte das Kraftwerk bis zu 3 Meter unter Wasser. Explosionen folgten und es entstanden Schäden; z. B.
Reaktor 1: Gebäude durch Knallgasexplosion beschädigt
Reaktor 2: Brennstäbe lagen mehrere Stunden frei (ohne Kühlung)
Reaktor 4: Abklingbecken ausgeronnen.

Störfall 5 und weitere: Verklappung
Darunter versteht man das unkontrollierte Entsorgen von Müll im Meer, hier im speziellen von Atommüll. Der sorg- und verantwortungslose Umgang in der Vergangenheit mit dem Atommüll hat dazu geführt, dass Staaten mit AKW das zu entsorgende Material einfach im Meer versenkt haben. Bereits 1982 protestierte Greenpeace gegen die Verklappung von Fässern mit Atommüll in der Nordsee. Man schätzt, dass allein vor der Atlantikküste Europas weit über 100 000 t „entsorgt" wurden. Was weltweit noch im Meer an verlorenen Atombomben, an havarierten Atom-U-Booten und dergleichen „lagert", ist nicht in vollem Umfang bekannt.

4.6.5 Kernwaffen *(nuclear weapons)*

Während des 2. Weltkriegs wurden die ersten Atombomben gebaut. Seit den Atombombenabwürfen über Japan 1945 wurden weitere, stärkere Nuklearwaffen entwickelt. Noch während des Kalten Krieges verpflichteten sich die USA und die UdSSR, ihre Waffenarsenale zu verkleinern. Trotzdem gibt es (nicht nur in den genannten Ländern) genügend Kernwaffen, um die Erde einige Male zu zerstören. Unberechenbare Potentaten halten die Diplomatie und die Weltbevölkerung in Atem.

Abb. 85.1 *Die nach heutigen Maßstäben primitive Bombe zerstörte 1945 einen Großteil der Stadt Hiroshima.*

Abb. 85.2 ***Uranbombe:*** *Die „Little Boy" genannte Bombe wurde am 5. 8. 1945 über Hiroshima in einer Höhe von 600 m gezündet. Sie hatte eine Masse von 3 t, obwohl sie nur 50 kg spaltbares Material enthielt. Etwa 150 000 Personen starben an den unmittelbaren Folgen.*

Abb. 85.3 ***Plutoniumbombe*** *„Fat Man": In der von den USA auf Nagasaki abgeworfenen Pu-Bombe (eine zeitgleiche Entwicklung zur Uranbombe) befinden sich mehrere in der Summe unterkritische Massen von ^{239}Pu. Die nahezu gleichzeitige Explosion zahlreicher Sprengkapseln komprimiert die Pu-Kugel, sodass sie überkritisch wird.*

Abb. 86.1 *Bindungsenergie pro Nukleon*

Merk & Würdig

Kernfusionsprozess in der Sonne

p + 2 n → $^{3}H^{+}$ + γ

^{3}He + ^{4}He → ^{7}Be + γ

^{7}Be + n → ^{8}B

8B → ^{8}Be + γ

Abb. 86.2 *Größenvergleich von Fusionsreaktor ITER (beachte rechts unten den Physiker)*

Abb. 86.3 *Stellarator (Teil des Plasmagefäßes)*

4.6.6 Kernfusion *(nuclear fusion)*

Die Sonne sendet seit Milliarden Jahren gewaltige Mengen von Energie aus. Die Quelle dieser Energie konnte im 20. Jahrhundert als **Kernverschmelzungsprozess** (Kernfusion, *thermonuclear fusion*) erklärt werden.

Leichte Kerne haben kleinere Bindungsenergie als Kerne mit einer Massenzahl um 50 **(Abb. 86.1)**. Wir vergleichen die Bindungsenergie von Deuterium und Helium:

Bindungsenergie pro Nukleon

^{2}H	2,5 MeV
^{4}He	7 MeV
Differenz	4,5 MeV

Könnte man also zwei Deuteriumkerne zu einem He-Kern verschmelzen, so würde die Energie von $4 \cdot 4{,}5$ MeV = 18 MeV frei.

Um die Coulomb´sche Abstoßung der Protonen zu überwinden, ist zunächst Energie notwendig. Sie kann überwunden werden, indem man die Kerne mit großer Geschwindigkeit aufeinander schießt, oder man erhitzt das verschmelzbare Material auf hohe Temperaturen. (Im Inneren der Sonne ist die thermische Bewegung bei der Temperatur von 10^{7} K so heftig, dass die Kernfusion einsetzt.)

Seit einigen Jahren versucht man, die Kernfusion zur Energiegewinnung zu nutzen. Neben erheblichen technischen Schwierigkeiten (extrem hohe Temperaturen, Probleme mit der Kühlung) sind finanzielle Engpässe ein Grund dafür, dass die kontrollierte Fusion bislang keine Energie geliefert hat.

Allen Reaktoren liegt zugrunde, dass sie das notwendige Plasma durch Einschluss in gewaltige Magnetfelder auf die erforderliche Temperatur von 10^{7} K bringen.

Die Deuterium-Deuterium-Reaktion $^{2}H + ^{2}H \rightarrow ^{4}He + n$ ist die energieliefernde Reaktion.

Mit den beiden folgenden Varianten will man das kritische Tripel (Temperatur: ≈ 400 Millionen Grad; Einschlusszeit: mindestens 3 Minuten; Dichte: $\approx 5 \cdot 10^{20}$ Teilchen/cm^{3}) der Kernfusion in den Griff bekommen.

Mit Hilfe von Magnetfeldern zwingt man das Plasma in einen ringförmigen (= toroidalen) Bereich. Das gelingt mit geeignet geformten Magneten. Zwei Möglichkeiten wurden bisher erfolgreich angewandt:

Das Tokamak-Prinzip

Abb. 86.4 *Das Magnetfeld wird durch ein torusförmiges Magnetfeld B_t und ein ringförmiges Magnetfeld B_o erzeugt.*

Das Stellarator-Prinzip

Abb. 86.5 *Mittels komplex geformter Magnetspule wird das Magnetfeld erzeugt.*

2005 gab es nach langen Verhandlungen den Startschuss für den Bau des so genannten ITER-Reaktors (***I****nternational* ***T****hermonuclear* ***E****xperimental* ***R****eactor*).

Die internationale Gemeinschaft beschloss, für insgesamt knapp 5 Milliarden Euro einen Versuchsreaktor in Cadarache in Südfrankreich zu bauen. Der Demonstrationsreaktor soll 2018 in Betrieb gehen und rund 20 Jahre mit einer Leistung von 500 MW laufen.

Beispiel 4.9

Fusionsenergie

Bei einer Verschmelzung von Wasserstoff-Atomen werden 7,3 MeV an Energie frei. 0,015 % des Wasserstoffs in Meerwasser ist Deuterium. Wie lange würde der Vorrat an Deuterium aus Meerwasser (durchschnittliche Tiefe 3 km) reichen, um den derzeitigen Energieverbrauch der Menschheit ($\approx 10^{13}$ W) mit Fusionsenergie allein zu stillen?

Das Volumen an Meerwasser beträgt etwa 10^{18} m³.

Das entspricht einer Masse von 10^{21} kg. Es gibt daher rund $3{,}3 \cdot 10^{46}$ Wassermoleküle im Meer. Davon sind 10^{43} Deuterium-Atome.

Pro Deuterium werden 7,3 MeV frei.

Im Ganzen sind das daher $10^{43} \cdot (7{,}3 \cdot 10^{6}\ \text{eV}) \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV}) = 1{,}1 \cdot 10^{31}\ \text{J}$

Daher reicht die Energie für

$$t = \frac{1{,}1 \cdot 10^{31}\ \text{J}}{1 \cdot 10^{13}\ \text{J/s} \cdot 3{,}2 \cdot 10^{7}\ \text{s/a}} = \mathbf{3{,}6 \cdot 10^{10}\ a}$$

Das ist 10-mal so lange, als die Sonne noch scheinen wird. Diese Energiequelle ist schier unerschöpflich, aber schwer zu erschließen. Außerdem produziert auch die Kernfusion radioaktiven Abfall.

Übungen

Mit diesen Übungen überprüfst du dein Wissen über die Kernspaltung.

Ü 4.27 In einem zukünftigen Fusionsreaktor soll folgende Fusionsgleichung ablaufen: $^{2}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + n$. 80 % der frei gesetzten Energie wird von den Neutronen aufgenommen. Wie viel Energie besitzt ein Neutron?

Nuklid	Atommasse
^{2}H	2,014102
^{4}He	3,016029
n	1,008665

Ü 4.28 Ein Physiklehrer erklärt: „Für die Fusion sind sehr hohe Temperaturen notwendig.
Bei der Fusionsreaktion $^{2}H + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}n$ rechnet man mit einer Energie von 10 keV. Das entspricht einer Geschwindigkeit von 10^{6} m/s. … Bei Zimmertemperatur gilt für H-Isotope: v = 2 000 m/s. Die notwendige Temperatur beträgt daher T = 75 Millionen Kelvin.“ Niemand weiß, wie man auf diese Temperatur kommt. Kannst du weiterhelfen?

Schätze mit Hilfe der kinetischen Energie der H-Atome und der Boltzmann-Gleichung $E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot kT$ die notwendige Temperatur ab.“

5 Teilchenphysik

In diesem Kapitel geht es um

- die Bausteine der Materie
- ihren Nachweis
- ihre Wechselwirkungen

Die Suche nach den **Bausteinen der Materie** begann bekanntlich mit den Griechen. DEMOKRIT und LEUKIPP prägten den Begriff **Atom**. Aber erst BOLTZMANN gelang es, einige Phänomene mit Hilfe des Atombegriffs zu erklären. Am Beginn des 20. Jahrhunderts begann man die Zusammenhänge besser zu verstehen. Man erkannte, dass das Atom aus einem **massiven Kern** und einer **Hülle aus Elektronen** besteht. Aber auch der Atomkern erwies sich als teilbar (Radioaktivität, Kernspaltung). Auf der anschließenden Suche nach den Eigenschaften der **Protonen** und **Neutronen** wurden in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts hunderte weitere Teilchen, die man **Elementarteilchen** (*elementary particles*) nannte, entdeckt. Ihre Anzahl wuchs derartig an, dass man von einem **„Teilchenzoo“** sprach und wegen der Fülle ihrer Eigenschaften zunächst nur wenig Gemeinsamkeiten fand.

5.1 Eigenschaften der Elementarteilchen[1]

(properties of elementary particles)

Trotzdem versuchte man, die Teilchen nach ihren Eigenschaften einzuteilen. Teilweise mussten neue Eigenschaften eingeführt werden, um ihr Verhalten korrekt zu beschreiben. Diese sind oft unanschaulich.

Man teilte die **Teilchen** aufgrund dieser ihrer Eigenschaften – ähnlich dem Periodensystem – in Gruppen ein:

aufgrund ihrer Masse		aufgrund ihres Spins	
Hadronen[2]	**Leptonen[3]**	**Fermionen[4]**	**Bosonen[5]**
Sie unterliegen der starken Wechselwirkung **(Kapitel 5.3)**	Sie unterliegen nicht der starken Wechselwirkung.	Sie besitzen den Spin $\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2} \ldots$ Für sie gilt das Pauliprinzip. Elektronen, Protonen und Neutronen sind Fermionen	Sie besitzen ganzzahligen Spin: $0, \pm 1, \pm 2 \ldots$ Für sie gilt das Pauliprinzip nicht. Sie können daher in sehr großer Zahl beliebig nahe beieinander sein.

5.2 Die Teilchen des Standardmodells

Seit 1978 liefert das „Standardmodell“ die beste Beschreibung des Verhaltens von Elementarteilchen. Dabei wird versucht, die Anzahl der fundamentalen Teilchen auf ein Minimum zu beschränken und gleichzeitig alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkung untereinander zu erklären. Die Basis dazu bildete der Vorschlag von GELL-MANN[6], den er in der Mitte des vorigen Jahrhunderts machte:
Er nahm die **Leptonen** und die **Quarks** als Fundamentalteilchen der Materie an. Um die Existenz der bereits bekannten Teilchen zu erklären, benötigt man **„3 Generationen“** oder **„3 Familien“**.

[1] Der Begriff **Elementarteilchen** ist historisch. Auch das Proton wird als Elementarteilchen bezeichnet, obwohl es aus Quarks besteht. Fundamentalteilchen lassen sich nach derzeitigem Stand der Kenntnis nicht weiter zerlegen.
[2] „hadros“ (griech.) = schwer
[3] „leptos“ (griech.) = leicht
[4] Benannt nach dem italienischen Physiker ENRICO FERMI (1901 – 1954), Nobelpreis 1938
[5] Benannt nach dem indischen Physiker SATYENDRANATH BOSE (1894 – 1974)
[6] MURRAY GELL-MANN (geb.1929 New York City). Er erhielt 1969 den Nobelpreis für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Elementarteilchen. Er nannte die zunächst hypothetischen Teilchen *„Quarks“* (nach einem Begriff im Roman *„Finnegans Wake“* von JAMES JOYCE).

Merk & Würdig

Elementarteilchen

Die Elementarteilchen sind die kleinsten Bausteine der Materie. **Fundamentalteilchen** lassen sich mit den momentan zur Verfügung stehenden Mitteln und Energien nicht weiter zerlegen.

Elektron

J. J. THOMSON konnte 1897 die Existenz von Elektronen nachweisen und entdeckte somit das erste Elementarteilchen. 1906 erhielt er für seine Entdeckung den Nobelpreis für Physik.

Proton

Aufgrund seiner Streuversuche erkannte RUTHERFORD die positive Ladung des Atomkerns. 1920 nannte er den Atomkern eines Wasserstoffatoms Proton.

Neutron

1932 wies SIR JAMES CHADWICK die vorausgesagte Existenz von Neutronen nach. Er beschoss Berylliumkerne mit Alphateilchen:

$^{9}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + n$

Dabei entstand Kohlenstoff und ein bisher unbekanntes, neues Teilchen: das freie Neutron.

Schon Demokrit wußte es so:
Der Kosmos ist bloß Teilchen-Zoo.
Doch die ...onen sich mehren
wie Karnickel zu Heeren.
Theoretiker macht das nicht froh!
Aus „Freche Verse – physikalisch“ von PETER HÄGELE

Abb. 89.1 *MURRAY GELL-MANN*

	Leptonen			Quarks			
	Name		Entdeckt	Name		Entdeckt	
Normale Materie	Elektron	e^-	1899	Up	u	um 1970	1. Generation
	Elektron-Neutrino	ν_e	1956	Down	d	um 1970	
Materie in höherem Energiezustand	Myon	μ	1937	Strange	s	um 1970	2. Generation
	Myon-Neutrino	ν_μ	1962	Charme	c	1974	
	Tauon	τ	1975	Bottom	b	1977	3. Generation
	Tauon-Neutrino	ν_τ	2000	Top	t	1995	

Tab. 90.1

Hadronen

Baryonen

Mesonen

3 Quarks

Quark + Antiquark

Abb. 90.1

5.2.1 Die Leptonen

Sie zeigen keine innere Struktur und auch keine messbare Ausdehnung. Sie erscheinen uns punktförmig, wenn sie mit anderen Teilchen in Wechselwirkung treten.

Familie	Teilchen	Masse in MeV/c_0^2	Ladung in e	Lebensdauer
Elektronen	Elektron	0,511	–1	$> 2 \cdot 10^{22}$ a
	Elektron-Neutrino	$< 2{,}2 \cdot 10^{-5}$	0	Stabil (?)
Myonen	Myon	105,7	–1	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s
	Myon-Neutrino	< 0,17	0	Stabil (?)
Tauonen	Tauon	1777	–1	$3{,}3 \cdot 10^{-13}$ s
	Tauon-Neutrino	< 16	0	Stabil (?)

Tab. 90.2

Quark-Antiquark-Paar

Abb. 90.2 *Versucht man zwei Quarks zu trennen, so wird die zugeführte Energie ab einem gewissen Abstand dazu benützt, ein Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen.*

5.2.2 Die Quarks

Quarks sind die zweite Art von Fundamentalteilchen des Standardmodells. Wie die Leptonen besitzen sie keine weitere innere Struktur, (soweit die Physiker bisher feststellen konnten).

Es gibt sechs Quarks, die man nach ihrem ***Flavour* („Geschmack“)** unterscheidet.

Ihre Ladung beträgt eine Drittel der Elementarladung[1] **(Tabelle 90.3)**.

Quark-Flavor	Ladung in e	Masse in MeV/c_0^2
Up	+ 2/3	≈ 2,4
Down	– 1/3	≈ 4,8
Strange	– 1/3	≈ 100
Charmed	+ 2/3	1 270
Top	+ 2/3	171 000
Bottom	– 1/3	4 200

Tab. 90.3

Quarks besitzen noch ein weiteres Merkmal: die **Farbladung** *(color)*.

Man wählte die Farben rot, grün und blau (in Analogie zu den Primärfarben).

Den Antiquarks werden die **Antifarben** antirot, antigrün und antiblau zugeordnet.

[1] Die Elementarladung ist daher nicht „elementar“.

Die Farbladung spielt für die Wechselwirkung zwischen den Quarks eine ähnliche Rolle wie die elektrische Ladung für die elektrische Kraft zwischen den Elektronen.

Versucht man z. B. Hadronen zu zerlegen, so erhält man immer nur ein Quark-Antiquark-Paar **(Abb. 90.2)**.

Quarks können nicht isoliert werden.

Sie sind die **Bausteine der Hadronen (Abb. 91.1 und 90.2)**. Diese werden in zwei Gruppen eingeteilt:

a) Baryonen: Sie sind aus drei Quarks aufgebaut.
Proton und Neutron sind Baryonen. Das Proton besteht aus 2 u-Quarks und einem d-Quark; das Neutron aus 2 d-Quarks und einem u-Quark.

b) Mesonen: Sie bestehen aus einem Quark und einem Antiquark.

Abb. 91.1 *Aufbau durch Quarks eines Protons (links) und eines Neutrons (rechts)*

5.3 Die Wechselwirkungen *(interaction)*

Im Laufe der Entwicklung der Physik hat sich gezeigt, dass sich alle beobachteten Kräfte mit Hilfe von **vier fundamentalen Wechselwirkungen (WW)** beschreiben lassen **(Kapitel 3.3.4)**.

Ihnen ist gemeinsam, dass durch den **Austausch von Teilchen** diese Grundkräfte erklärt werden.

a) Die elektromagnetische Wechselwirkung

An ihr nehmen alle Teilchen teil, die **elektrisch geladen** sind oder ein magnetisches Moment besitzen. Im Rahmen des Standardmodells ist das **Photon γ** das Wechselwirkungsteilchen der elektromagnetischen Kraft. Durch den stetigen Austausch von Photonen kommt es z. B. zu einer Abstoßung zwischen gleichartigen Ladungen.

b) Die schwache Wechselwirkung *(weak interaction)*

Die schwache Wechselwirkung „spüren“ sowohl die Leptonen als auch die Quarks. Im Gegensatz zur elektromagnetischen Kraft hat sie jedoch eine sehr geringe Stärke und Reichweite, etwa 10^{-18} m. Die Wechselwirkungsteilchen sind nicht masselos, sondern sind sogar schwerer als das Proton.

c) Die starke Wechselwirkung *(strong interaction)*

Sie wirkt zwischen Quarks, also z. B. im Atomkern, wo sie für dessen Stabilität verantwortlich ist. Die Wechselwirkung erfolgt durch Austauschteilchen, die **Gluonen** genannt werden.

d) Die Gravitationswechselwirkung *(gravitational interaction)*

An ihr nehmen alle Teilchen teil. Für die Elementarteilchen spielt sie wegen ihrer geringen Stärke keine Rolle. Die Übertragung erfolgt durch noch nicht nachgewiesene **Gravitonen**. EINSTEIN hat bereits 1916 darauf hingewiesen, dass bewegte massive Körper **Gravitationswellen** abstrahlen.

Abb. 91.2 *Die Vereinheitlichung der 4 Wechselwirkungen. Blaue Skala: Alter des Universums*

Die Vereinheitlichung bei der Planck-Skala ist eine theoretische Überlegung und noch keineswegs experimentell bestätigt.

Wechselwirkung	stark	elektromagnetisch	schwach	gravitativ
Austauschteilchen	Gluonen	Photon	W^0 und Z^0	Graviton
Masse in GeV/c_0^2	0	0	81 bzw. 91	0
Quelle	Farbladung	elektrische Ladung	schwache Ladung	Masse
wirkt auf	Quarks	elektrisch geladene Teilchen	Quarks und Leptonen	alle Teilchen, die Masse (Energie) besitzen
Reichweite in m	10^{-15}	∞	10^{-18}	∞
verantwortlich für	Zusammenhalt des Atomkerns, Kernenergie	Chemie, Elektrizität, Magnetismus	β-Strahlung, Sonnenschein	Massenanziehung

Tab. 91.1

Abb. 92.1 *Schematischer Aufbau eines Speicherrings, in dem Protonen (rot) und Antiprotonen (blau) sich gegenläufig bewegen. In Speicherringen können solche Teilchenpakete oft Milliarden Kilometer zurücklegen, bevor gezielt in Detektoren Kollisionen stattfinden.*

Abb. 92.2 *Querschnitt durch ein Beschleunigungsrohr des LHC. Die supraleitenden Spulen (B = 8,3 T) zwingen den Protonenstrahl in eine Kreisbahn. Um die Supraleitung aufrecht zu erhalten, müssen die Magnete auf –270 °C gekühlt werden und Ströme von 12 000 A fließen.*

5.4 Beschleuniger *(accelerator)*

Um die Vorhersagen der Standardtheorie zu überprüfen, sind **immer größere Energien notwendig** geworden, ebenso für die Erzeugung immer schwererer Teilchen. Beschleuniger erzeugen Teilchenstrahlen mit Energien bis in den TeV-Bereich. Die Teilchenstrahlen bestehen vor allem aus Elektronen oder Protonen. Nach einer Beschleunigungsstrecke treffen sie auf ein **Ziel**, das sogenannten **Target**, das oft nur einige mm^2 groß ist.

Ein häufig verwendeter Beschleunigertyp ist das **Synchrotron**. Mit Hilfe von regelbaren Magneten werden die Teilchen auf eine ringförmige Bahn gezwungen. Man wählt einen großen Bahnradius, um die Magnete möglichst klein bauen zu können. Das größte Protonensynchrotron befindet sich bei Genf an der Grenze zwischen Frankreich und Schweiz, das europäische Laboratorium für Teilchenphysik CERN (**C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire). Im sogenannten LHC *(**L**arge **H**adron **C**ollider)*, einem 27 km langen Ring, werden zwei gegenläufige Protonenstrahlen auf jeweils 7 TeV gebracht.

Ab etwa 50 MeV besitzen die Protonen bereits 10 % der Lichtgeschwindigkeit. Es ist daher notwendig, relativistische Effekte zu berücksichtigen.

Diese hohen Energien sind notwendig, um die Bindungsenergie der Nukleonen im Kern zu überwinden und so die innere Struktur zu untersuchen. Die dabei entstehenden neuen Teilchen vertiefen unser Verständnis des Aufbaus der Materie: das Standardmodell wird dadurch bestätigt (oder widerlegt).

So wurde damit die Existenz des so genannten **Higgs-Bosons**[1] entdeckt. Es wird als das Teilchen angesehen, das dafür verantwortlich ist, dass Teilchen Masse besitzen. Die aktuellen Messwerte stimmen mit den theoretischen Werten immer mehr überein. Mit dessen Nachweis ist ein zentrales Problem des Standardmodells gelöst.

Abb. 92.3 *Um störende Einflüsse (vor allem wegen der Höhenstrahlung) auszuschließen, wurde der LHC und seine Detektoren ALICE, ATLAS, CMS und LHCb[2] etwa 100 m unterhalb der Erdoberfläche gebaut.*

Abb. 92.4 *Wissenschaftler beobachten am PC Teilchenspuren, die auf das Higgsteilchen schließen lassen.*

Abb. 92.5 *Bei der Kollision gegenläufiger Teilchenstrahlen steht die gesamte Energie von 900 GeV zur Verfügung.*

5.5 Detektoren *(detectors)*

In den **Kollisionspunkten** (den *„Fireballs"*) entstehen pro Sekunde bis zu 800 Millionen rasche, kurzlebige Teilchen. (Gemäß der Gleichung $E = m \cdot c_0^2$ wird aus Bewegungsenergie Masse.)

Ihre Eigenschaften (z. B. Geschwindigkeit, Masse, Ladung, Zerfallszeit) können nur kraft **riesiger Detektoren** untersucht werden, die große Datenmengen in kurzer Zeit aufnehmen. Diese Daten werden schließlich mit leistungsfähigen Computern ausgewertet und visualisiert.

1) PETER HIGGS (geb. 1929) , britischer Physiker, erhielt 2013 gemeinsam mit dem belgischen Physiker FRANCOIS ENGLERT (geb. 1932), den Nobelpreis für Physik.

2) ATLAS (**A T**oroidal **L**HC **A**pparatu**s**), ALICE (**A L**arge **I**on **C**ollider **E**xperiment), CMS (**C**ompact **M**uon **S**olenoid), LHCb (**LHC b**eauty)

Zum Vermessen der Teilchen werden folgende Detektortypen eingesetzt:

Teilchenspurdetektoren, Drahtkammer (Abb. 93.2)

Diese bestehen aus einer großen Anzahl **parallel gespannter Drähte**, die jeweils abwechselnd an hohe Spannungen gelegt werden. Tritt ein elektrisch geladenes Teilchen durch die Gas gefüllten Kammern, so werden Gasmoleküle ionisiert, die zu den nächstgelegenen Drähten driften („Drahtdriftkammer"). An den Drähten entstehen elektrische Signale, aus denen mit Hilfe von Computern Teilchenbahnen berechnet werden. Obwohl die Abstände zwischen den Drähten bzw. Kathodenstreifen im Bereich mehrerer Millimeter liegen, können die Teilchenbahnen mit Genauigkeiten von einigen Zehntel Millimeter bestimmt werden, indem die Signalstärken benachbarter Drähte bzw. Streifen verglichen werden.

Drähte

geladenes Teilchen

Ausgangssignale

Abb. 93.1 *An den Drähten wird kurzzeitig(≈ 10^{-6} s lang) eine Spannung von 10 – 20 kV angelegt. Man erreicht dadurch eine gezielte Vorauswahl nachzuweisender Ereignisse.*

Szintillationszähler *(scintillation counter,* Abb. 93.2*)*

Ein derartiger Detektor besteht aus dem Szintillator **(Szintillationskristall)** und dem **Sekundärelektronenvervielfacher**.

Szintillatoren haben die Eigenschaft, unter der Einwirkung von schnellen Teilchen selbst Photonen im sichtbaren Bereich auszusenden.

Über Zwischenschritte (= Erzeugung von geladenen Teilchen) lassen sich auch Neutronen und Gammaquanten nachweisen.

Die Röntgen- oder Gammastrahlung erzeugt im Szintillationskristall einen Lichtblitz …

… welcher in der Photokathode ein Elektron freisetzt.

Der Elektronenstrom wird durch Elektroden verstärkt und …

dies ergibt einen kurzen elektrischen Impuls.

Zähler

Photokathode

Anode

Hochspannung

Röntgen- oder Gammastrahlung

Abb. 93.2 *Als Szintillationskristall wird meist ein Einkristall aus Natriumjodid verwendet.*

Halbleiterdetektoren *(semiconductor detector,* Abb. 93.3*)*

Diese beruhen aus in **Sperrrichtung gepolten Si-Dioden**.

Wird eine Spannung von etwa 100 V angelegt, so sind alle beweglichen Ladungsträger aus dem Kristall verschwunden.

Tritt ein geladenes Teilchen in den Kristall ein, so entstehen durch Stöße Elektronen und Löcher, die ein Spannungssignal an der Diode verursachen. Dieses ist proportional zur abgegebenen Energie.

Ein ionisierendes Teilchen erzeugt Elektronen-Löcher-Paare.

Zähler

n

p

Halbleiter(Si)-Diode

Abb. 93.3 *In Halbleiterdetektoren können auch Teilchen mit geringer Energie detektiert werden. Sie sind meist als dünne Halbleiterplättchen ausgebildet.*

Universaldetektoren ATLAS (Abb. 93.4)

In Beschleunigern werden zurzeit Universaldetektoren eingesetzt, um möglichst viele unterschiedliche Daten der stattfindenden Reaktionen aufnehmen zu können. Der Ort der Kollision ist fast lückenlos von Schichten sehr empfindlicher Messinstrumente umgeben.

Myon-Dedektoren

elektromagnetische Kalorimeter

Spule

Vorwärts-Kalorimeter

Spule

22 m

Spule

innerer Detektor

44 m

Hadron-Kalorimeter

Abschirmung

Abb. 93.4 ***Universaldetektor ATLAS:*** *Beachte den Größenvergleich mit einem Menschen (roter Pfeil)!*

Merk & Würdig

Derzeit kennt man über 60 „elementare" Teilchen:

- 6 Leptonen und ihre Antiteilchen = *12 Teilchen*
- 6 Quarks in 3 Farben und ihre Antiteilchen = *36 Teilchen*
- *12 Wechselwirkungsteilchen* (1 Photon, die 3 Bosonen W^+, W^-, Z^0, 8 Gluonen)
- *1 Higgsteilchen* (vermittelt Masse)

5.6 Jenseits des Quants *(beyond the quantum)*

Man ist allgemein der Meinung, dass das Standardmodell noch nicht vollständig ist. So sind **folgende Fragen noch nicht geklärt** oder es fehlt ein experimenteller Nachweis:

- Ist das Proton stabil oder besitzt es eine geschätzte Halbwertzeit von mehr als 10^{32} Jahren?
- Gibt es magnetische Monopole?
- Sind Quarks und Leptonen strukturlos oder sind sie „echte" Fundamentalteilchen?
- Wieso gibt es so viel Materie und keine Antimaterie?
- Wieso haben die Naturkonstanten genau den Wert, den wir kennen?
- Wie viele Elementarteilchen gibt es wirklich?
- Wie kann man die Gravitation in das Standardmodell integrieren?

Dieser Fragenkatalog ist selbstverständlich nicht vollständig!

Ergänzung & Ausblick

Um diese und andere Fragen zu beantworten, sucht man eine **Theorie von Allem** *(Theory of Everything, TOE)*. Dabei versucht man, die bereits bekannten (und bewiesenen) Tatsachen so zu einer in sich geschlossenen Theorie zusammenzufassen.

1) Supersymmetrie SUSY

Der Vorschlag besteht darin, dass es zu jedem Fermion (Teilchen mit halbzahligen Spin) einen bosonischen Partner geben muss und umgekehrt; d. h., zu jedem Teilchen gibt es einen supersymmetrischen „Zwilling" **(Tabelle 94.1)**.

2) Stringtheorie

Elementarteilchen werden nach dieser Theorie nicht als punktförmig angesehen, sondern als fadenförmige Gebilde, ähnlich wie winzige schwingende **Saiten** *(strings)*.

Aufgrund ihrer Ausdehnung können einige mathematische Schwierigkeiten von punktförmigen Teilchen behoben werden.

Allerdings sagt diese Theorie voraus, dass es mehr als drei Dimensionen gibt (ein Modell fordert z. B. 10 Dimensionen). Da wir aber nur drei Dimensionen sehen, müssen die weiteren Dimensionen „eingerollt" sein **(Abb. 94.1)**.

Eine unerwartete Anwendung der Stringtheorie fanden in jüngster Zeit die Festkörperphysiker. Zu ihrer Überraschung eignet sich die Theorie zur Beschreibung von Quantenzuständen in Festkörpern. Insbesondere erhofft man sich eine tiefere Einsicht in die Mechanismen der Supraleitung.

Teilchen	SUSY-Partner
Name	Name
Leptonen (z.B. Elektron) Quarks	Sleptonen (z.B. Selektron) Squarks
Gluonen	Gluinos
W, Z-Bosonen	Wino, Zino

Tab. 94.1

Abb. 94.1 *Wenn man ein Blatt Papier zu einer äußerst dünnen Röhre zusammenrollt, so erscheint das Blatt praktisch eindimensional.*

6 Astrophysik

In diesem Kapitel geht es um

- die Gravitation und ihr Feld
- unsere kosmische Heimat
- Sterne
- Galaxien
- Zukunft und Vergangenheit des Universums

6.1 Die Gravitation *(gravitation)*

In **Band 1, Kapitel 6**, wurde bereits die Gravitation(skraft) besprochen: Zwei Körper ziehen einander mit der Kraft

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

mit $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ (Gravitationskonstante) an. Die Gravitationskraft tritt auch dann auf, wenn die Massen räumlich voneinander getrennt sind. Diese Eigenschaft nennen die Physiker **Feld**. Den Begriff kennen wir bereits vom elektrischen und dem magnetischen Feld.

Analog dazu gibt es daher auch bei der Gravitation den Begriff **Feldlinien** (*lines of force*, **Abb. 96.1**).

Abb. 96.1 *Die Feldlinien verlaufen radial zum Erdmittelpunkt. Die Kräfte auf die Probemassen m werden durch die Länge der roten Pfeile charakterisiert.*

Die Beschleunigung a, die eine Masse m durch die Gravitationskraft erfährt, nennt man Gravitationsfeldstärke. Wir erhalten durch Gleichsetzen der beiden Gleichungen

$$F = m \cdot a \text{ und } F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \rightarrow a = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

Es ist zu beachten, dass r der Abstand der Schwerpunkte der beiden Massen M und m ist.

In der Nähe der Erdoberfläche verlaufen die Feldlinien annähernd parallel, sodass wir vereinfacht schreiben können:

$$a \approx g \approx 9{,}81\ \text{m/s}^2$$

Wir wollen nun bestimmen, welche Arbeit notwendig ist, um eine Masse m im Gravitationsfeld der Erde (Masse M, *gravity field of earth*) zu bewegen. Dazu unterscheiden wir zwei Fälle:

Fall 1: Die Masse m bewegt sich entlang einer Feldlinie in Richtung der Kraft **(Abb. 96.2)**. Dabei wird von der Masse Arbeit verrichtet: Die Masse fällt. Die potenzielle Energie nimmt ab. Bei entgegen gesetzter Bewegung muss Arbeit aufgewendet werden: Die Masse m wird gehoben. Die potenzielle Energie nimmt zu.

Abb. 96.2 *Die Masse m wird vom Abstand r_1 vom Erdmittelpunkt auf die Höhe r_2 gehoben.*

Es gilt

$$W = \int_{r_1}^{r_2} F(r)dr = \int_{r_1}^{r_2} G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} dr = -GMm \cdot \frac{1}{r}\Big|_{r_1}^{r_2} = -GMm \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) = GMm \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$$

W ist die Arbeit, die man aufbringen muss, um eine Masse m von r_1 auf r_2 zu heben.

Merk & Würdig

Hubarbeit W

$$W = GMm \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

M … Zentralmasse, *[M] = kg*
m … (Probe)masse, *[m] = kg*
r_1, r_2 … Abstände vom Erdmittelpunkt
G … Gravitationskonstante
$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2$

a) $r_1 = 0$
Die Masse wird vom Erdmittelpunkt gehoben. Für die Hubarbeit erhalten wir daher

$$W = -G \cdot \frac{Mm}{r_2}.$$

Das entspricht der potenziellen Energie der Masse.
Das negative Vorzeichen bedeutet, dass man Arbeit aufwenden muss, um h zu vergrößern **(Abb. 96.2)**.

b) $r_2 = \infty$
Eine Masse m wird unendlich hoch gehoben, z. B. eine Rakete, die das Gravitationsfeld der Erde verlässt.
Da der $\lim\limits_{r_2 \to \infty} \frac{1}{r_2} = 0$ ergibt sich die Arbeit mit $W = GMm \cdot \frac{1}{r_1}$.
Mit $r_2 \Rightarrow \infty$ ist gemeint, dass die Masse nicht auf die Erde zurück fällt und auch keine Kreisbahn um die Erde beschreibt.
Beachte: Die dazu notwendige Arbeit ist nicht unendlich groß.

Fall 2: Die Masse bewegt sich normal zu den Feldlinien. Kraft und Weg stehen aufeinander normal; daher ist die zu verrichtende Arbeit null: $W = 0$, bzw. $\Delta E_{pot} = 0$

Solche Linien in der Ebene nennt man **Äquipotenziallinien** (*equipotential line*, **Abb. 96.3**) bzw. Äquipotenzialflächen im Raum.

Hinweis: Feldlinien und Äquipotenziallinien dienen auch anderen Feldern, z. B. elektrostatischen und magnetischen Feldern **(Band 3, Kapitel 8.2.3** und **Kapitel 3.3.3 in diesem Band)** zur Veranschaulichung des Sachverhalts.

Abb. 96.3 *Äquipotenziallinien*

Merk & Würdig

- Felder sind Raumgebiete, in denen Kräfte festgestellt werden können.
- Hubarbeit muss nur entlang der Feldlinien aufgebracht werden
- Potenzielle Energie in der Entfernung r_2 vom Erdmittelpunkt:
  $W = -G \cdot \frac{Mm}{r_2}$.
- Bewegungen entlang von Äquipotenziallinien bedürfen keiner Arbeit.

Beispiel 6.1

Die European Space Agency ESA startet von Kourou aus die Rakete Ariane-5 (Startmasse m = 750 t), um in 4 000 km Höhe einen Wettersatelliten auszusetzen. Welche Arbeit ist dazu notwendig?

Wenn wir die Masse der Erde $M = 6 \cdot 10^{24}$ kg und den Erdradius $r_1 = 6\,380$ km und $r_2 = 10\,380$ km berücksichtigen, können wir sofort in die Gleichung für die Hubarbeit

$$W = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

einsetzen und erhalten

$$W = 1{,}8 \cdot 10^{13}\ \text{J}.$$

Hinweis: Hätten wir mit der Gleichung $W = m \cdot g \cdot h$ gerechnet, so wäre die Arbeit $W' = 2{,}9 \cdot 10^{13}$ J; ein zu großer Wert. Bei dieser Gleichung ist g = const, was nicht der Fall ist. Erst die Integralrechnung kann berücksichtigen, dass die anziehende Gravitationskraft, und damit g, kontinuierlich kleiner wird.

Abb. 97.1 *Ariane 5 ECA wurde für Nutzlasten bis zu 10 t gebaut.*

Beispiel 6.2

1977 starteten die USA die Raumsonde Voyager 1 (Masse m = 700 t). Mittlerweile ist sie bereits jenseits der Plutobahn. Welche Arbeit ist dafür notwendig?

Beachte: In diesem Beispiel ist M die Masse der Sonne: $M = 2 \cdot 10^{30}$ kg

Wir setzen in die Gleichung $W = G \cdot Mm \frac{1}{r_1}$ die gegebenen Werte ein und erhalten

$$6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\text{N m}^2\,\text{kg}^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{30}\,\text{kg} \cdot 700 \cdot 10^3\,\text{kg} \cdot \frac{1}{20 \cdot 10^{12}\,\text{m}} = 5 \cdot 10^{12}\ \text{J}$$

Hinweis: Diese Energie musste am Anfang der Reise aufgebracht werden. Der mitgeführte Treibstoff diente nur zur Kurskorrektur. Für die Versorgung der Messgeräte und des Senders hat die Sonde eine Plutoniumbatterie an Bord.

Abb. 97.2 *Voyager 1 (künstlerische Darstellung NASA). Voyager 1 is the first human-made object, about 20 billion kilometres away from the earth.*

Ergänzung & Ausblick

1) Das Gravitationspotenzial

Mit diesem Begriff lässt sich das Gravitationsfeld beschreiben. Mit der Gleichung

$$W = -G \cdot \frac{Mm}{r}$$

lässt sich nun die Arbeit berechnen, um eine Masse m von der Erdoberfläche ins Weltall zu schießen.

Um eine Masse von 1 kg von der Erdoberfläche (r_2 = 6 380 km) wegzuheben, muss man $6{,}26 \cdot 10^7$ J aufwenden. Diese Arbeit wird als potenzielle Energie gespeichert.

W ist allerdings noch von der Masse m abhängig. Um davon unabhängig zu werden, dividiert man W durch m und erhält das so genannte Potenzial V:

$$V = \frac{W}{m} = -G \cdot \frac{M}{r}$$

Das Gravitationspotenzial beträgt somit auf der Erdoberfläche **$V = -6{,}26 \cdot 10^7$ J/kg.**

Mit verschiedenen Werten von r kann man das Gravitationspotenzial grafisch darstellen (**Abb. 98.1** und **Abb. 98.2**).

Merk & Würdig

Gravitationspotential V

$$V = \frac{W}{m} = -G \cdot \frac{M}{r}$$

G … Gravitationskonstante
m … Masse eines (kleinen) Probekörpers, *[m] = kg*
M … Masse des Zentralkörpers, *[M] = kg*
r … Abstand vom Schwerpunkt des Zentralkörpers, *[h] = m. [V] = J/kg*

Vergleich mit dem elektrischen Potenzial einer Punktladung:

$$V = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

Abb. 98.1 *Zweidimensionale Darstellung des Potenzialtopfs des Systems Erde – Mond*

Abb. 98.2 *Vereinfachte dreidimensionale Darstellung des irdischen Gravitationsfelds; die Bahn eines Himmelskörpers ist rot eingezeichnet.*

2) Klima beeinflusst die Schwerkraft

Seit 2002 vermessen die Tandem-Satelliten GRACE (***G**ravity **R**ecovery **a**nd **C**limate **E**xperiment*) das irdische Schwerefeld[1]. Seither sind die Forscher in der Lage, den globalen Wasserkreislauf exakter als in der Vergangenheit abzuschätzen. Die Kenntnis über das Ausmaß des Abschmelzens der Eismassen und damit das Verändern der Massenverteilung gemeinsam mit den glazialen isostatischen[2] Veränderungen ist für Modelle und Szenarien des Klimawandels **(Kapitel 10.2.1)** von großer Wichtigkeit.

Abb. 98.3 *Das Bild zeigt (übertrieben) die Abweichung der Erde von der Form eines idealen Rotationsellipsoids. In der Mitte ist Afrika zu erkennen. Die Delle rechts ist südlich von Indien und liegt 105 m unterhalb des Referenzellipsoids.*

[1] Die Aufgabe von GRACE ist es, die zeitliche Veränderung des Gravitationsfelds der Erde aufgrund dynamischer Vorgänge in ihrem Inneren, von Meeresströmungen sowie von Veränderungen der Eisbedeckung von Arktis und Antarktis und in Gebirgen zu gewinnen.
[2] Glaziale Isostasie = das Anheben des Erdbodens auf Grund fehlender Eismassen (Gletscher, Grönland, Polregionen)

Übungen

Überprüfe zum Thema Gravitation und Gravitationspotential deine Fähigkeiten im Finden von Lösungsansätzen und rechnerischen Ergebnissen! Du benötigst dazu folgende Daten:
$m_{Erde} = 6 \cdot 10^{24}$ kg, $m_{Mond} = 7{,}4 \cdot 10^{22}$ kg, Abstand Erde – Mond $r_{EM} = 384\,000$ km,
Abstand Erde – Sonne $r_{ES} = 1{,}5 \cdot 10^{8}$ km

Ü 6.1 Wie groß ist die Masse der Sonne? Berechne dies mit Hilfe der Gravitationskraft.

Ü 6.2 **a)** Welche Kraft ist größer? (Schätze ab!)
- ☐ Schwerkraft zwischen Erde und Mond
- ☐ Schwerkraft zwischen Erde und Sonne

b) Berechne die beiden Kräfte.

Ü 6.3 Ein Astronautenteam landet auf dem Planeten Fermat und bestimmt mit Hilfe eines einfachen Pendels die dort herrschende Fallbeschleunigung zu $g_{Fermat} = 13{,}2\ m/s^2$. Zuvor hatten sie noch den Durchmesser des Planeten mit 9 500 km bestimmt. Berechne die Masse von Fermat.

Ü 6.4 Du willst die Schwerebeschleunigung auf der Sonnenoberfläche bestimmen. Welche Werte brauchst du?

a) Abstand Erde – Sonne, Masse der Erde
b) Masse der Sonne, Sonnendurchmesser
c) Abstand Erde – Sonne, Sonnendurchmesser
d) Keinen der drei

Ü 6.5 Beim Ausfüllen des folgenden Lückentexts überprüfst du die Auswirkungen des Klimas auf die Gravitation.

Auf Grönland lastet eine Eismasse von etwa $3 \cdot 10^{15}$ t. Diese Eismasse ________ auf der Landmasse. Wenn das Eis schmilzt, wird die Lithosphäre entlastet. Es entsteht ein ________, das von GRACE gemessen werden kann. An dieser Stelle ist die Bahn des Satelliten um einige Zehntelmillimeter ________ bei der Erde. Das geschmolzene Eis (ca. 240 Milliarden Tonnen pro Jahr) verteilt sich gleichmäßig auf die Weltmeere und lässt den Wasserspiegel um 0,7 mm pro Jahr ________. Das ________ der Erde ändert sich dadurch. Sogar die jahreszeitlich bedingten Veränderungen des Wassergehalts der Atmosphäre lässt sich mit GRACE nachweisen.

Benütze folgende Wörter: näher – drückt – steigen – Massenträgheitsmoment – Massendefizit

Ü 6.6 Das erste Kepler´sche Gesetz lautet: »*Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einen Brennpunkt die Sonne steht.*«

a) Kepler sprach nur von „Ellipsenbahnen". Heute spricht man von Bahnen in Kegelschnittform. Welche Form haben sie?
b) Welche Bedeutung hat der andere Brennpunkt, von dem im Gesetz die Rede ist?
- **1)** In ihm steht die viel diskutierte, aber nie entdeckte Gegenerde.
- **2)** Er hat nur astrologische Bedeutung.
- **3)** Er hat keine astronomische Bedeutung; er ist sozusagen eine mathematische Notwendigkeit.
- **4)** Ohne ihn würde die Erde keine stabile Bahn um die Sonne haben.

Ü 6.7 Das zweite Kepler´sche Gesetz lautet: »*Der Radiusvektor Sonne – Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.*« Was kann man damit bestimmen bzw. erklären?

a) Abstand Sonne – Planet
b) die unterschiedliche Länge der Jahreszeiten
c) Ebbe und Flut
d) Nichts; es ist bloß ein interessantes Gesetz.

Hinweis: Benütze für deine Überlegungen **Abb. 99.1**

Abb. 99.1 *stark übertriebene Darstellung einer Planetenbahn*

Ü 6.8 Mit welchen der folgenden Proportionen kann man prinzipiell die Geschwindigkeit v eines Satelliten um die Erde berechnen?

a) $v \sim r^2$ **b)** $v \sim r$ **c)** $v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$ **d)** $v \sim \frac{1}{r}$

r … Radius der Satellitenbahn

Ü 6.9 Ein Satellit umrundet die Erde. Wenn man seine Masse verdoppelt, so …

a) wird er langsamer und stürzt bald ab.
b) passiert nichts.
c) wird er schneller wegen der direkten Proportionalität zwischen Masse und kinetischer Energie.
d) nimmt sein Abstand von der Erdoberfläche zu.

Übungen

Ü 6.10 Abb. 100.1 zeigt ein Feld. Kann es einem
- **a)** Gravitationsfeld,
- **b)** magnetischen Feld,
- **c)** Temperaturfeld,
- **d)** elektrischen Feld,
- **e)** Strömungsfeld

zugeordnet werden? Begründe deine Antwort und interpretiere den physikalischen Hintergrund.

Ü 6.11 Setze „Äquipotenziallinie/n" oder „Feldlinie/n" ein.
- **a)** Durch ______________ werden physikalische Felder dargestellt.
- **b)** ______________ sind Kurven, deren Richtung in jedem Punkt mit der Feldstärke übereinstimmt.
- **c)** ______________ sind mit den Höhenlinien im Atlas zu vergleichen.
- **d)** ______________ weisen radial auf die Zentralmasse.

Abb. 100.1

„Die Leute haben Sterne, aber es sind nicht die gleichen. Für die einen, die reisen, sind die Sterne Führer. Für andere sind sie nichts als kleine Lichter. Für wieder andere, die Gelehrten, sind sie Probleme."
ANTOINE DE SAINT-EXUPERY

6.2 Sterne *(stars)*

Die Astronomie ist die älteste Wissenschaft. Sie hat sich in der Antike fast ausschließlich mit der Beobachtung der Lage der Himmelskörper begnügt. Das Licht wurde benutzt, um die scheinbare Bewegung der Sonne, des Mondes und der Sterne zu beobachten. Erst als man anfing, das Licht selbst zu untersuchen, hat sich unser Wissen über die Sonne und die Sterne vervielfacht.

6.2.1 Entfernungsbestimmung *(determination of distance)*

Stellvertretend werden zwei Methoden gezeigt:

a) Parallaxenmethode

Durch den jährlichen Umlauf der Erde um die Sonne scheinen Sterne eine Bewegung am Himmelsgewölbe auszuführen **(Abb. 100.2)**. Diese Verschiebung eines Sterns lässt sich durch eine Winkelmessung zahlenmäßig erfassen. Wegen der geringen Parallaxe weiter entfernter Sterne ist diese Entfernungsbestimmung nur bis etwa 30 pc möglich.

Abb. 100.2 *Parallaxenmethode*

Merk & Würdig

Parsec

1 Parsec, pc (Parallaxensekunde) ist die Entfernung, aus der die große Halbachse der Erdbahn unter einem Winkel von einer Bogensekunde erscheint.

1 pc = 3,3 Lj = $3 \cdot 10^{13}$ km

b) Rotverschiebung

Für Objekte außerhalb unserer Galaxis (der Milchstraße) sind die vorigen Methoden zu ungenau. 1929 stellte HUBBLE einen Zusammenhang zwischen Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien fest. Dieser Zusammenhang ist als **Hubble-Gesetz** bekannt.

Merk & Würdig

Hubble-Gesetz $\quad v_r = H_0 \cdot r$

v_r … Geschwindigkeit der Galaxie relativ zur Erde
H_0 … Hubble-Konstante; $H_0 = 73\ \text{kms}^{-1}/\text{Mpc}$
r … Entfernung von der Erde

Hinweis: 73 kms^{-1}/Mpc bedeutet, dass pro Mpc (Megaparsec) Entfernung von der Erde die Fluchtgeschwindigkeit (von der Erde weg) um 73 km/s zunimmt.

Galaxie in Ruhe

Galaxie bewegt sich mit 19 % c_0

Galaxie bewegt sich mit 75 % c_0

300 500 700 900
Wellenlänge in nm

Abb. 101.1 *Aus der Verschiebung der Absorptionslinie lässt sich auf die Entfernung des Objekts schließen.*

Geschwindigkeit in kms^{-1} 10^3 0
0 10^6 $2 \cdot 10^6$
Entfernung in Parsec

Abb. 101.2 *Das **Hubble-Diagramm** zeigt die lineare Beziehung zwischen Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit für relativ nahe gelegene Galaxien (bis etwa 15 Mpc).*

Das Hubble-Gesetz wurde so interpretiert, dass sich der Raum ausdehnt und sich damit die Galaxien umso schneller von uns weg bewegen, je entfernter sie sind **(Abb. 101.2)**. Er formulierte mit diesem Gesetz die **Expansion des Universums** und löste damit eine kosmologische Revolution aus. Bis dahin glaubte man an ein statisches Universum. Die Rotverschiebung wird aktuellen Theorien zufolge der zeitlichen Zunahme der Abstände zugeschrieben.

Die **kosmische Inflation** und die **dunkle Energie** **(Kapitel 6.3)** beeinflussen die Expansion des Universums und damit auch den Wert von H_0.

6.2.2 Sternentstehung

a) Entstehung eines Sterns *(star formation)*

Der Raum zwischen den Sternen ist nicht „leer". Tatsächlich gibt es in unserer Milchstraße nirgendwo ein Gebiet frei von Materie. Aus der so genannten **interstellaren Materie** *(interstellar medium)* bilden sich im Laufe der Zeit Sterne. Die Materiedichte beträgt dort etwa 1 bis 3 H-Atome pro cm^3. Diese bilden **Gasnebel** oder **Molekülwolken**. Durch Unregelmäßigkeiten in der Masseverteilung oder durch Stoßwellen einer benachbarten Sternexplosion kann dieses dünne interstellare Gas eine **Kontraktion** beginnen; es bilden sich Kondensationsbereiche aus. Die entstehenden Objekte sind **Protosterne**.

Mit zunehmender Verdichtung der Materie steigen Druck und Temperatur gewaltig an. Bei ausreichender Masse werden der Gravitationsdruck und die Temperatur schließlich so groß, dass eine Kernreaktion ausgelöst wird ($T > 10^7$ K). Die **Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium** beginnt. Der Fusionsprozess läuft dann z. B. im Inneren der Sonne in 8 ‰ des Sonnenvolumens ab. Derartige Sternentstehungsvorgänge werden mit dem Hubble Space Teleskop beobachtet.

Abb. 101.3 *In diesem Gebiet entstehen etwa 1 000 neue Sterne. Sie sind so heiß, dass sie die Wolke zum Leuchten bringen.*

b) Entstehung eines Planetensystems *(formation of solar systems)*

Man nimmt an, dass die Entstehung unserer Planeten etwa gleichzeitig mit der der Sonne vor etwa 4,4 Milliarden Jahren stattgefunden hat. Bei der Kontraktion traten nicht nur ein Zentrum, sondern mehrere Kondensationspunkte auf, in denen sich die Materie verdichtet hat. Die Materiewolke nahm wegen der Rotation zunächst die Form einer **Scheibe** an. In der Mitte bildete sich die Sonne, der Außenbereich zerfiel in eine Vielzahl von Haufen. Dabei könnte in der rotierenden Gaswolke durch **Turbulenzen** die Anhäufung von schwerer Materie in den äußeren Zonen erleichtert worden sein.

großer Drehimpuls
kleiner Drehimpuls
Kollapszone
Protostern

Abb. 101.4 *Eine Materiewolke führt wegen der Gravitation im Weltall eine Kontraktion aus. Es entsteht ein Protostern. Er strahlt vor allem wegen der auf ihn fallenden Materie. (Zum Begriff „Drehimpuls" siehe Band 1, Seite 136.)*

c) Hauptreihensterne *(main sequence stars)*

Sterne mit geringer Masse besitzen eine geringe Leuchtkraft, sodass sie ihren Wasserstoffvorrat nur langsam verbrauchen und eine Lebensdauer von einigen Milliarden Jahren besitzen.

Massereiche Sterne (bis zu 130 Sonnenmassen) gehen verschwenderisch mit ihrem Vorrat um. Der Fusionsprozess läuft so schnell ab, dass der Vorrat bereits nach 10 Millionen Jahren aufgebraucht ist. Sterne „leben" also nicht ewig. Jeder Stern hat irgendwann einmal seinen Wasserstoffvorrat verbraucht. Was dann geschieht, hängt wieder von der Masse des Sterns ab.

Anmerkung: Für unsere Sonne bedeutet das, dass sie bei ihrer Geburt (als sie noch den gesamten Wasserstoffvorrat hatte) 94 % der heutigen Größe, 70 % der heutigen Helligkeit und eine geringere Oberflächentemperatur hatte. In den nächsten 5 Milliarden Jahren wird sie heißer und heller werden.

Abb. 102.1 *Der Gasball schrumpft solange, bis sich Gravitation und Gasdruck das Gleichgewicht halten.*

d) Supernova

Am 23. Februar 1987 fand ein astronomisches „Jahrhundertereignis" statt: Am Südhimmel in der „großen Magellanschen Wolke", einer Nachbargalaxie, flammte ein Stern auf, dessen Helligkeit in den folgenden Monaten noch stieg. Er war dann mit bloßem Auge auf der Südhalbkugel zu sehen. Der Stern Sanduleak-69°202, der erst 20 Jahre vorher entdeckt worden war, war explodiert (**„Supernova"**). Dies ist zugleich der Zusammenbruch eines massereichen Sterns sowie die Geburt neuer chemischer Elemente.

Genau genommen wurde die Supernova schon Stunden vorher durch einen **Neutrinostrom** in Detektoren in Japan und den USA nachgewiesen[1]. Die für derartige Ereignisse geringe Entfernung von 165 000 Lichtjahren machte eine genaue Untersuchung der Vorgänge des Endstadiums des Sterns möglich.

Wie kommt es zu einer Supernova?

Nach rund 10 Milliarden Jahren sind die letzten Wasserstoffatome in der Zentralregion zu Helium verschmolzen worden. Die Kernreaktionen kommen kurzzeitig zum Stillstand, sodass die Atome immer dichter zusammengepresst werden. Die Temperatur steigt daher im Inneren bis auf $2 \cdot 10^8$ K. Gleichzeitig bläht sich der Stern bis auf den 100-fachen ursprünglichen Durchmesser auf. Die Oberfläche kühlt dabei ab, sodass die Farbe des Sterns von bläulich-weiß nach rot wechselt. Ein so genannter **roter Riese** *(red giant)* ist entstanden, während im Zentrum der Heliumkern weiter kontrahiert. Die Temperaturerhöhung im Inneren führt zur Fusion von Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff.

Abb. 102.2

Noch 1 000 Jahre bis zur Supernova: *Weitere Kernfusionen zu Neon und Magnesium verhindern den Kollaps.*

Noch 1 Jahr bis zur Supernova: *Die Temperatur ist mittlerweile auf $2 \cdot 10^9$ K geklettert. Silizium und Schwefel entstehen. Konzentrische Schalen aus den leichteren Elementen umgeben den Kern.*

Noch einige Tage bis zur Supernova: *In diesem Stadium entsteht Eisen. Es ist das letzte Element, das im Sterninneren entstehen kann. Die Eisenkugel stürzt mit 70 000 km/s in sich zusammen. In dieser Hitze ($\approx 10^{11}$ K) bilden sich Neutrinos.*

Die äußere Hülle des Sterns stürzt auf den komprimierten Kern. Dort wird sie brutal gestoppt und schwingt mit hoher Geschwindigkeit zurück. Auf diese Weise wird die Sternhülle ins All geschleudert.

[1] Die Neutrinos kommen direkt aus dem Sterninneren. Sie durchdringen mühelos die äußeren Schichten, während die Stoßwelle länger braucht.

Kollabierender Stern

kleiner als 1,5 Sonnenmassen

Weiße Zwerge

Nach dem Abklingen der Kernfusion bildet sich ein kompakter Kern aus Helium und möglicherweise bilden sich einige schwerere Elemente aus. Ein solcher Stern wird **weißer Zwerg** *(white dwarf)* genannt, weil ein Stern von der Masse der Sonne in diesem Endstadium nur mehr den Durchmesser von 10^7 m (Vergleich Erde: $d \approx 7 \cdot 10^6$ m) aufweist. Die Kompensation des Gravitationsdrucks ist wegen der fehlenden Kernfusion nicht mehr durch den thermischen Druck der Sternmaterie möglich. Da im weißen Zwerg der **Elektronendruck** dem Gravitationsdruck das Gleichgewicht hält, bleibt er auch nach dem Auskühlen stabil. Weiße Zwerge wurden zunächst als Partner von Doppelsternen, später auch als Einzelsterne entdeckt.

Abb. 103.1 *Der Stern im Zentrum des planetarischen Nebels MyCn18 (Abstand zur Erde 8000 Lj) ist ein weißer Zwerg. Die Aufnahme stammt vom Hubble Space Teleskop.*

1,5 bis 3 Sonnenmassen

Neutronensterne

Der Gravitationsdruck kann nicht mehr durch den Druck der Elektronen kompensiert werden. Der Stern kollabiert weiter. Der Heliumkern des Sterns kontrahiert unter Kernverschmelzungen von Heliumkernen zu schwereren Kernen. Dabei werden Elektronen in den Atomkern gepresst und mit Protonen zu Neutronen gebunden. Unzählige Neutrinos werden dabei frei. Die bei diesem Kollaps frei werdende Gravitationsenergie kann zu einer gewaltigen Abstoßung von Sternmaterie der äußeren Sternhüllen führen: Bei derartigen **Sternexplosionen** kann die abgegebene Strahlungsleistung die gesamte Strahlungsleistung einer Galaxie übertreffen. Die ausgestoßene Materie kann bis zu 90 % der Gesamtmaterie des Sterns ausmachen. Das Sterninnere kollabiert jedoch weiter, die Dichte des Sterns wächst, bis bei einer Dichte über 10^{16} kg/m³ im Inneren nur mehr Neutronenmaterie vorliegt. Bei einer Sterngröße von etwa 10^4 m kommt der Kollaps zum Stillstand.

Einen rotierenden Neutronenstern nennt man **Pulsar** *(**Pulsa**ting source of **r**adio emission)*.

größer als 3 Sonnenmassen

Schwarze Löcher

Derartige Sterne explodieren am Ende ihres Lebens als sogenannter **Typ-II Supernova**. Dabei kann der Druck der Gravitation im Sternenrest auch durch den Quantendruck der Neutronen nicht mehr aufrecht erhalten werden und der Stern kollabiert zu einem Schwarzen Loch.

Abb. 103.2 *Das Schwarze Loch zieht von seinem Begleiter in einer Akkretionsscheibe Materie an und schleudert sie an den Polen nach außen (künstlerische Darstellung).*

Lebenslauf der Materie

Urknall
Beginn von Zeit, Raum und Materie. Aus Strahlungsenergie werden die ersten Teilchen. Als feinverteilte Gase expandieren sie in den Raum.

Protogalaxien
In den auseinanderdriftenden Gasen entstehen gigantische Wirbel, die sich zu Galaxien verdichten und deren Gravitation den Raum dazwischen leerfegt.

Sternentstehung
Die eigene Gravitation in den Verdichtungen lässt das Gas zusammenklumpen, bis im Innern die Wasserstoff-Fusion zündet: Ein Stern beginnt zu leuchten.

Interstellare Materie
Der Raum zwischen den Sternen ist nicht leer, er ist erfüllt mit Gas und Staub. Man kann diese Teilchen als Dunkelwolken oder leuchtende Nebel sehen.

Sternwind
Aus der heißen Atmosphäre der Sterne dampfen ständig Teilchen in den Raum. Der Sonnenwind enthält Protonen, Alpha-Teilchen und Elektronen.

Supernovareste
Bei der Explosion entstehen Elemente bis hinauf zum Uran. Staubförmig treiben sie durch den Raum: Material für neue Sterne.

Sternentwicklung
Ist der Wasserstoff im Kern verbrannt, zündet die Helium-Fusion. So geht es – zunehmend rascher – im Periodensystem aufwärts, bis zum Eisen.

Supernova
Der Kern eines massereichen, sterbenden Sterns stürzt in sich zusammen. Die äußeren Hüllen werden mit gewaltiger Energie weggeschleudert.

Weißer Zwerg
Das Zentrum des Sterns ist zusammengeschrumpft – groß wie die Erde und hell wie die Sonne. Im Lauf von Jahrmilliarden kühlt es aus.

Neutronenstern
Der kompakte Kern aus Neutronenmaterie sendet Radiostrahlung aus, die durch rasche Rotation des Sterns wie Leuchtturmstrahlen den Raum durchstreicht.

Schwarzes Loch
Die eigene Gravitation ist so groß, dass die Kernmaterie unaufhaltsam in sich zusammenstürzt. Nichts kann entkommen – nicht einmal das Licht.

6.3 Die Entwicklung des Universums

Es wird heute als stark abgesicherte Tatsache angesehen, dass das Universum vor etwa 10^{10} Jahren in einer „Urknall" genannten Singularität entstanden ist.

- Vor **13,8 Milliarden Jahren**: An diesem „Beginn der Zeit" war alle Materie und Strahlung (= Energie) in einem kleinen Raumgebiet „unendlicher" Dichte zusammen gepresst.
- **Bis 10^{-43}** s nach dem Urknall gab es nur eine Kraft, jene, die in der **TOE** *(Theory of Everything)* **(Kapitel 5.6)** als „die Kraft" angenommen wird. Raum, Zeit, Materie und Strahlung sind nicht voneinander unterscheidbar. Die Temperaturen schätzt man auf 10^{32} K, die Dichte auf 10^{97} kg/m³.
- **ca. 10^{-35} s** nach dem Urknall trennt sich die elektroschwache von der starken Wechselwirkung und es kommt zu einer starken Expansion des Universums. Diese Expansion ist unter dem Namen **kosmische Inflation** bekannt. Die bisherige kurze Schilderung der Entwicklung des Kosmos ist sehr hypothetisch.
- Ab der **10^{-12}ten Sekunde** ist die weitere Entwicklung des Universums durch Experimente in CERN bei Energien im TeV-Bereich bestätigt worden.
- **Eine Sekunde** nach dem Urknall trennte sich die elektromagnetische Kraft von der schwachen Kernkraft. Es vereinigen sich die freien Quarks zu Protonen und Neutronen.
- **Drei Minuten** nach dem Urknall ($T = 10^9$ K) bilden sich die ersten Atomkerne und in weiterer Folge die ersten Elemente: Deuterium und Helium.
- In den nächsten **10 000 Jahren** dominierte der Elektromagnetismus: Das kosmische Gas war noch Plasma mit freien Elektronen. Diese absorbieren jede Strahlung, das Plasma war daher undurchsichtig. In der Folge kühlte die Materie auf 3 000 K ab. Danach entkoppelten Materie und Strahlung und die Materie und die Gravitation gewannen an Einfluss – das Universum wurde durchsichtig. Der Rest der Strahlung tritt nunmehr als **Hintergrundstrahlung** (= 3 K-Strahlung) auf. Sie enthält Information über die Energiedichte aus der Zeit ihrer Entstehung.

Abb. 105.1 *Geschichte des Kosmos*

Übungen

Überprüfe zum Thema Sterne deine Fähigkeiten im Finden von Lösungsansätzen.

Ü 6.12 Zeichne in **Abb. 103.2** die notwendigen Größen ein, um die Entfernung des Sterns S von der Erde zu bestimmen.

Stern ✶

Position der Erde — Sonne — Position der Erde nach einem halben Jahr

Abb. 103.2

Ü 6.13 Gib an, welche Einheit und welchen Zahlenwert $\frac{1}{H_0}$ hat?

Ü 6.14 In der Astronomie gilt für die Möglichkeit der Entstehung eines Sterns aus einer Gaswolke (Masse m, Teilchenmasse m_0) das sogenannte Jeans-Gesetz:

$$m > \frac{3 \cdot k \cdot T \cdot r}{2 \cdot G \cdot m_0}$$

a) Benenne die in der Gleichung enthaltenen Größen.

b) Zeige durch eine Einheitengleichung, dass die Einheit der rechten Seite Kilogramm ist.

c) Interpretiere die Gleichung.

d) Astronomen entdeckten ein Sternentstehungsgebiet von r = 30 Lj. Schätze ab, welche Mindestmasse die Wolke haben muss. Wie vielen Sonnenmassen entspricht das? ($m_{Sonne} = 2 \cdot 10^{30}$ kg, $m_H = 3{,}3 \cdot 10^{-27}$ kg)

Ergänzung & Ausblick

Dunkle Materie

Beobachtungen von Galaxien **(Abb. 106.1)** haben gezeigt, dass für ihre Stabilität zusätzlich zur sichtbaren Materie auch die Existenz der sogenannten **dunklen Materie** notwendig ist. Welcher Art diese Materie ist, ist noch Spekulation.

Rotations-geschwindigkeit
tatsächlicher Verlauf
errechneter Verlauf
Entfernung vom Zentrum der Galaxie

Abb. 106.1 *Die Rotationsgeschwindigkeit von Sternen im Außenbereich von Galaxien ist viel größer als sie durch die sichtbare Massenverteilung sein dürfte. Ein Indiz für die dunkle Materie.*

Dunkle Energie

Aus aktuellen Beobachtungen muss man schließen, dass der Raum wieder stärker expandiert. Diese zweite Expansionsbewegung (= Inflation) nach dem Urknall begann vor etwa 5 Milliarden Jahren. Ursache könnte eine abstoßende Kraft sein. Diese vermutet man als Merkmal des Vakuums (siehe **Kapitel 3.3.4**). Man bezeichnet diese exotische Eigenschaft als **„dunkle Energie"**.

Der weitere Verlauf der Geschichte des Universums hängt – wie es jetzt aussieht – von der dunklen Energie und ihren weiteren Eigenschaften ab.

68 % dunkle Energie
0,003 % Strahlung
26 % exotische dunkle Materie
4,8 % gewöhnliche sichtbare Materie

Abb. 106.3 *Woraus aus heutiger Sicht das Universum besteht; die ca. 5 % „normale" Materie sind Baryonen, Neutrinos, Galaxien, Sterne, …*

Abb. 106.2 *So könnte die Verteilung der Dunklen Materie im All in einer 3-D-Darstellung aussehen. Mit Hilfe eines Magnet-Spektrometers auf der ISS will man das in den nächsten Jahren untersuchen.*

7

Wärme und Temperatur

In diesem Kapitel geht es um

- **Temperatur**
- **Temperaturmessung**
- **Wärme und Energie**
- **Verdunsten und Schmelzen**
- **Anomalie des Wassers**
- **Heizwert**

7.1 Der Temperaturbegriff *(the concept of temperature)*

Der Temperaturbegriff ist eng mit unserer Empfindung für „heiß" oder „kalt" verbunden. In der Physik gibt es ein objektives Maß für dieses subjektive Empfinden: die **Temperatur**.

Die Temperatur

- ist eine **physikalische Grundgröße**, die den Wärmezustand eines physikalischen Systems, z. B. eines Körpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases kennzeichnet.
- ist ein Maß für die **mittlere kinetische Energie** der Teilchen eines Systems. Je größer die Wärmebewegung der Teilchen, desto höher ist die Temperatur. (Mehr darüber im Kapitel 8 „Gaskinetik".) Im Zusammenhang mit dem Temperaturbegriff und der Temperaturmessung steht eine sehr alltägliche Erfahrung:
- der **Temperaturausgleich („Nullter Hauptsatz der Thermodynamik")**: Bringt man Körper mit verschiedener Temperatur in thermischen Kontakt, dann findet ein Temperaturausgleich statt. Dabei geht Wärme vom Körper mit ursprünglich höherer Temperatur auf den mit niedriger Temperatur über **(Kapitel 7.2.1)**.

Abb. 108.1 *Wir können nur Temperaturunterschiede erkennen.*

7.1.1 Temperaturskalen

Merk & Würdig

$\Delta T = \Delta\vartheta$
Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ in Grad Celsius ist gleich der Differenz ΔT in Kelvin
$-273{,}16\,°C = 0\,K$
$T = \vartheta + 273{,}16$
T … Temperaturangabe in K
ϑ … Temperaturangabe in °C

Wird ein Gegenstand erwärmt, dann ändern sich einige seiner Eigenschaften. Beispielsweise vergrößert sich bei steigender Temperatur zumeist das Volumen; bei Gasen erhöht sich in einem geschlossenen Gefäß der Druck und bei Metallen erhöht sich bei Erwärmung der elektrische Widerstand. All diese Eigenschaften eignen sich mehr oder weniger zur Temperaturmessung. Zur objektiven Temperaturmessung benötigt man ein Messgerät, das Thermometer (*thermometer*).

Das Messen einer Temperatur ist möglich, wenn man eine physikalische Einheit festlegt. Dazu einigt man sich auf zwei Fixpunkte auf einer Temperaturskala. In Europa hat sich die

- **Celsius-Skala**[1] durchgesetzt („Experiment" **Abb. 109.2**). Das Temperaturintervall ist zwischen dem Gefrierpunkt und dem Siedepunkt des Wassers in 100 gleiche Teile unterteilt, von denen jeder einer Temperaturdifferenz von einem Grad Celsius (1 °C) entspricht. Symbol für Temperaturangaben in °C ist der griechische Buchstabe ϑ (theta).
- **Kelvin-Skala**[2] : In der Physik ist die „thermodynamische Temperaturskala" *(thermodynamic temperature)* gebräuchlich. Die Einheit der (absoluten) Temperatur wurde als SI-Basiseinheit mit 1 Kelvin (= 1 K) definiert. Temperaturdifferenzen der Kelvinskala sind gleich groß wie entsprechende Differenzen der Celsiusskala. Die tiefste mögliche Temperatur ist mit 0 K (bzw. –273,16 °C) definiert **(Kaptitel 8.2.1)**; sie wird als **absoluter Nullpunkt der Temperatur** bezeichnet.

Merk & Würdig

Definition von 1 K als Basiseinheit des SI-Systems
Das Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunkts[3] des Wassers.

Abb. 108.2 *WILLIAM THOMSON (Lord Kelvin)*

[1] ANDERS CELSIUS (1701 Uppsala – 1744 Uppsala) , schwedischer Astronom. Er gründete die erste schwedische Sternwarte und bestimmte als erster messtechnisch die Helligkeit von Sternen, er wies den Zusammenhang zwischen Nordlicht und Erdmagnetfeld nach. Celsius engagierte sich auch für die Einführung der Gregorianischen Kalenderreform in Schweden und war Mitglied einer Expedition nach Lappland zum „Ende der Welt", um die Theorie Newtons zur Abplattung der Erdpole zu bestätigen.

[2] SIR WILLIAM THOMSON (1824 Belfast – 1907 Netherhall, Schottland), britischer Mathematiker und Physiker. Er wurde in der Westminster-Abtei neben dem Grab von Newton beigesetzt. Er lieferte grundlegende Beiträge zur Wärmelehre und der Theorie der elektromagnetischen Strahlung. Er entwickelte Messgeräte – insgesamt wurden ihm 70 Patente erteilt.

[3] Siehe Kapitel 7.3.2

- In den USA werden Temperaturen heute noch überwiegend in **Fahrenheit** angegeben.

  Umrechnungsformel von Celsius in Fahrenheit:

  $$T_{in\ °F} = \left(\frac{9}{5} \cdot \frac{\vartheta}{°C} + 32\right) \cdot °F$$

Experiment

Hält man ein Thermometer in ein Gefäß, das mit Eiswasser gefüllt ist, stellt sich eine gewisse Temperatur ein. Diese Temperatur, der Eispunkt oder Gefrierpunkt des Wassers, ist ein Fixpunkt der Skala und wird mit 0 °C definiert. Taucht man das Thermometer in einen Topf mit siedendem Wasser, stellt sich der sogenannte Siedepunkt ein. Dies ist der zweite Fixpunkt der Celsiusskala (100 °C).

Abb. 109.2 *„Arbeit im Eichamt" …*

°F °R °K °C
212 80 373 100
122 40 323 50
32 0 273 0
0 -14 255 -18

Abb. 109.1 *Bei der Fahrenheit-Skala liegt der Siedepunkt des Wassers bei 212 °F und der Schmelzpunkt von Eis bei 32 °F; Réaumur wählte für den Siedepunkt des Wassers 80 °R.*

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen durchführst, kannst du mit Temperaturskalen umgehen.

Ü 7.1 Lufttemperatur: Fast jedes Telefongespräch handelt vom Wetter; der Freund in New York meint, es habe dort +20 °F. In Wien zeigt das Thermometer –2 °C an. Wo ist es wärmer?

Ü 7.2 Die Temperaturen vom Sonneninneren (T_1 = 15,6 · 10^6 K) und von der Sonnenoberfläche T_2 = 5 760 K) sind in Kelvin angegeben.

a) Welchen Wert haben diese Temperaturen in Grad Celsius?

b) Wie groß ist der prozentuelle Fehler, wenn diese Temperaturen irrtümlich in Grad Celsius, anstatt in Kelvin verwendet werden?

Ü 7.3 *Suffering on a journey to the USA? The doctor wants to know the body temperature.*

a) *How many Fahrenheit correspond to 37.5 °C?*

b) *The doctor thinks that we have to take medicine only at body temperature above 101 °F. To which temperature does this correspond in centigrade?*

7.1.2 Thermometer *(thermometer)*

Zur Konstruktion eines Thermometers benützt man temperaturabhängige Eigenschaften von Materialien. Für die Auswahl eines Thermometers ist unter anderem der Temperaturbereich wichtig, bei dem es eingesetzt werden soll. Geräte zur Temperatursteuerung nennt man **Thermostat**.

- **Flüssigkeitsthermometer**

  Hier nutzt man die temperaturabhängige Volumsänderung von Flüssigkeiten aus. Die Messflüssigkeit (z. B. Alkohol oder Quecksilber) befindet sich in einem dünnwandigen Vorratsgefäß, an das eine dünne Röhre angeschlossen ist. Wesentlich ist, dass sich die Flüssigkeit bei Erwärmung stärker ausdehnt als der (Glas-)Kolben. Je dünner die Kapillare ausgeführt wird, desto empfindlicher reagiert der Flüssigkeitsspiegel auf eine Temperaturänderung. Je nach Füllung (und Gasdruck über der Flüssigkeit) können Temperaturen zwischen 150 K und 700 K gemessen werden.

- **Bimetallthermometer**

  Hier nutzt man die durch Temperaturänderung bewirkte Längenänderung von Metallstreifen aus **(Band 1, Kapitel 2.3.3)**. Zwei Streifen mit verschiedener Wärmeausdehnung werden miteinander verbunden. Sie dehnen sich unterschiedlich aus. Die Folge ist, dass sich der Bimetallstab krümmt. Damit kann man sehr geringe Temperaturunterschiede messen. Bimetallthermometer verwendet man bis +500 °C. Sie sind einfach zu bedienen und billig.

Bimetallfeder
Achse
°C
°F

Abb. 109.3 *Das Prinzip des **Bimetallthermometers** wird oft als Messgeber in Thermostaten verwendet. Der Bimetallstreifen schließt oder öffnet dabei einen Stromkreis.*

Abb. 110.1 *Der **Seebeck-Effekt** bildet die Grundlage für die Thermoelemente: In einem aus zwei verschiedenen Leitern gebildeten Stromkreis besitzen die Lötstellen verschiedene Temperatur. Es entsteht eine Thermospannung, die der Temperaturdifferenz proportional ist.*

- **Thermoelement**

  Es beruht auf der Temperaturabhängigkeit der Kontaktelektrizität. Das Phänomen wird nach dem Entdecker[1] Seebeck-Effekt genannt. Misst man diese (sehr kleine) Spannung an den Drahtenden **(Abb. 110.1)**, erhält man ein Maß für die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kontaktstellen. Der Messbereich beträgt je nach Metallkombination 25 K bis 1 400 K.

  Thermosäule *(thermopile)*: Durch Reihenschaltung mehrerer Thermoelemente wird die Spannung erhöht und die Messung empfindlicher. Wegen ihrer Kleinheit werden sie in Form von Integrierten Schaltungen angewendet und eignen sich für schwer zugängliche, entfernte oder sensible Messstellen (z. B. zur Messung der Körpertemperatur).

- **Widerstandsthermometer**

  Elektrische Widerstandsthermometer benützen die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands. Für Metalle gilt: Je wärmer ein Metall ist, desto weniger Strom fließt. Sein elektrischer Widerstand steigt. Man sagt: Metalle haben einen positiven Temperaturkoeffizienten (abgek: PTC[2]).

  Für Halbleiter gilt: Ein Halbleiter-Widerstand (Thermistor, NTC)[2] nimmt bei Erwärmung ab. Der Temperaturkoeffizient ist negativ. Die kleinen Bauelemente können leicht in elektronische Schaltungen integriert werden. Sie werden beispielsweise zur thermischen Überwachung von Akku-Zellen und Prozessoren in Notebooks eingesetzt. Der Messbereich ist je nach Bautype sehr verschieden: 17 K bis 900 K.

- **Photometrie, Infrarotthermografie**

  Wird die „Farbe" (die Wellenlänge) der Infrarotstrahlung zur Temperaturmessung herangezogen **(Band 3, Kapitel 7.1** und **Band 4, Kapitel 10.1)**, dann sind auch Messungen an schwer zugänglichen Körperoberflächen relativ niedriger Temperatur möglich (z. B. Messungen an Gebäuden, um die Wärmeisolation zu überprüfen). Die Auswertung erfolgt mit infrarotempfindlichem Fotomaterial oder digital mittels CCD-Chips.

Abb. 110.2 *reagiert sehr schnell auf Temperaturänderungen und wird zur Temperaturüberwachung in elektronische Schaltungen eingebaut.*

Merk & Würdig

- Unter **Wärme** versteht man eine Energieform, die von der ungeordneten Bewegung kleinster Teilchen stammt.
- Der Temperaturbegriff ist eng mit unserer Empfindung für „heiß" oder „kalt" verbunden.
- Die Temperatur ist eine **physikalische Grundgröße** mit der Einheit **Kelvin K**.
- Die **Temperatur** ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen eines Systems.
- Zur Temperaturmessung eignen sich physikalische Effekte, die im Zusammenhang mit einer Temperaturänderung eintreten.

[1] THOMAS JOHANN SEEBECK, dt. Physiker (1770, Reval – 1831, Berlin) beriet Goethe bei seinen optischen Studien

[2] PTC = Positive Temperatur Coefficient, NTC = Negative Temperatur Coefficient

7.2 Wärme und Energie *(heat and energy)*

NEWTON und GALILEI haben im 17. Jahrhundert die Theorie der Griechen übernommen, dass Wärme von der Bewegung kleinster Teilchen stammt. Im 18. Jahrhundert entwickelte sich die Vorstellung, Wärme sei ein unsichtbarer Stoff: das **„Caloricum"**.

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts stellte THOMPSON[1] genauere Beobachtungen an: Insbesondere versuchte er die „Wärmesubstanz" zu wiegen – es ist ihm nicht gelungen. Aber er stellte fest, dass

- die Wärmesubstanz (falls es sie geben sollte) ein verschwindend kleines Gewicht haben müsste, und
- beim Aufbohren von Kanonenrohren Wärme entsteht, die quantitativ beschrieben werden konnte.

Damit war die Theorie des „Caloricums" widerlegt. Trotzdem dauerte es noch einige Jahrzehnte, bis sich die „mechanische Theorie" der Wärmelehre durchsetzte.

Der Bierbrauer (und Privatgelehrte) JAMES JOULE führte in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Experimente mit recht genauen Messungen zur Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme durch. Aus ihnen ergab sich, dass das Auftreten von Wärmeenergie stets auch mit dem Verschwinden von mechanischer Energie verbunden ist.

Abb. 111.1 *Aufbohren von Kanonenrohren (Prinzipzeichnung): Thompson schrieb: „… heat was continually produced only when the horses were working, and that more heat was produced when the bit was dull than when it was sharp."*

Experiment

Umwandlung von Reibungsenergie in Wärme

Das Kalorimeter besteht aus einem Metall- oder Glasgefäß, das gut wärmeisoliert ist. Ein Rührwerk dreht sich langsam in dem mit Wasser gefüllten Gefäß. Die mechanische Energie, die dem Rührwerk von außen zugeführt wird, lässt sich über die potenzielle Energie des Gewichts mit der Masse m berechnen **(Abb. 111.2)**. Im Inneren bietet die Flüssigkeit einen Widerstand. Diese Reibung erhöht die **Innere Energie** des Wassers; dies ist durch die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ messbar. Den Betrag, um den sich die Innere Energie erhöht, bezeichnet man als Wärmemenge Q. Verdoppelt man die Gesamthöhe, stellt man auch eine doppelt so große Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ fest:

$Q = m \cdot g \cdot h$

Es gilt die Proportionalität: $Q \sim \Delta\vartheta$

h … Gesamthöhe, um die die Masse m absinkt; *[h] = m*

T
m
F
h
Wasser
Rührwerk

Abb. 111.2 *Das Prinzip des Experiments von JOULE*

[1] SIR BENJAMIN THOMPSON, GRAF RUMFORD (1753 Massachusetts, damals britische Kolonie – 1814 Paris). Rumford führte ein recht abenteuerliches Leben: Mit 19 Jahren wurde er Offizier der britischen Armee; von den amerikanischen Revolutionären der Spionage für Großbritannien bezichtigt, musste er nach England fliehen. Dort führte Thompson neben seiner militärischen Laufbahn wissenschaftliche Studien weiter. Er untersuchte beispielsweise die Sprengkraft von Schießpulver und erfand ein Kommunikationssystem für Schiffe auf See. 1784 wurde Thompson in den britischen Adelsstand erhoben. Nur wenig später quittierte er seinen Dienst, um ins Exil nach München zu gehen. Er wurde Berater des bayrischen Königs und Leiter des Militärarsenals, Kriegs- und Polizeiminister. Er führte die Kartoffel ein und erfand eine Vielzahl nützlicher Küchengeräte, z. B. eine Kaffeeröstmaschine und eine Thermoskanne.

Abb. 111.3 *BENJAMIN THOMPSON*

Abb. 112.1 *Solarthermisches Kraftwerk: Strahlungsenergie wird in Wärme umgewandelt. In der Turbine wird Wärme in mechanische Energie umgewandelt; im Generator wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.*

7.2.1 Energieumwandlung und Wärme *(conversion of energy)*

JOULE und THOMPSON haben mit ihren Experimenten gezeigt, dass man mechanische Energie in Wärme umwandeln kann. Oft wird Wärme allerdings nicht mit Absicht erzeugt, sie wird unerwünscht frei. Man spricht dann von „Energie- oder Wärmeverlusten". Man beobachtet, dass Energieverluste dann vorliegen, wenn eine Umwandlung in eine andere Energieform stattfindet. Beispielsweise geht beim Bremsen eines Fahrzeuges Wärme in den Bremsscheiben ungenützt „verloren".

Physikalische und chemische Vorgänge, bei denen Wärme frei wird, heißen exotherme Prozesse.

Beispiele für exotherme Prozesse

- **Mechanische Energie wird in Wärme umgewandelt.**
  Reibung, Verformung (Schmieden, Spanabhebung, Komprimieren von Gasen, …). Mechanische Energie wird in Wärme umgewandelt.
- **Chemische Energie wird in Wärme umgewandelt.**
  Sie kann über den „Umweg" Wärme in mechanische Energie oder elektrische Energie umgewandelt werden (Motor, Turbine + Generator). Bei der Verbrennung, beim Löschen von Kalk, dem Aushärten von Beton oder Gips, wird Wärme oft ungenützt freigesetzt.
- **Elektrische Energie wird in Wärme umgewandelt.**
  Im Haarfön, Lötkolben und in der Kaffeemaschine wird Joule´sche Wärme genutzt. Ungenutzt wird Joule´sche Wärme in Form von Leitungsverlusten freigesetzt. Auch bei der Umwandlung von elektrischer Energie in eine andere Energieform lassen sich Wärmeverluste nicht vermeiden. Die Joule´sche Wärme kann über $P = I^2R$ ermittelt werden.
- **Strahlungsenergie wird in Wärme umgewandelt.**
  Bei der natürlichen Erderwärmung, im Sonnenkollektor und im Treibhaus werden die Strahlen der Sonne (elektromagnetische Strahlung wie Licht oder Wärmestrahlung) absorbiert und in Form von Wärme genutzt.
- **Kernenergie wird in Wärme umgewandelt.**
  Kernphysikalische Prozesse: Kernfusion (z. B. Wasserstofffusion in der Sonne), Kernspaltung (z. B. Atomkraftwerk), radioaktiver Zerfall (z. B. Erwärmung des Erdkerns durch den Zerfall instabiler Radionuklide).

Alle erwähnten Prozesse unterliegen dem Prinzip der Energieerhaltung.

Prinzip von der Erhaltung der Energie

In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie konstant.
Verschiedenste Energieformen können in Wärme umgewandelt werden.

Energie geht nicht verloren, sie wird auch nicht „erzeugt" oder „verbraucht". Die quantitative Formulierung dieses Zusammenhangs nimmt als **Erster Hauptsatz der Wärmelehre** einen wichtigen Stellenwert in der Thermodynamik ein **(Kapitel 9.1.1)**.

Die **Rückumwandlung** von Wärme in verschiedene Energieformen ist nur sehr bedingt möglich. Dies gilt auch für den Wärmefluss selbst; dieser ist nicht reversibel (umkehrbar):

Ein Körper erwärmt sich bei Kontakt mit einem heißeren Körper, (der sich dadurch abkühlt). Umgekehrt kann ein Körper von niederer Temperatur nicht ohne zusätzliche Energiezufuhr von außen Wärme an einen heißeren Körper abgeben. Dies funktioniert beispielsweise beim Kühlschrank nur durch mechanische (bzw. elektrische) Energie.

Wärme fließt von selbst stets vom heißeren zum kühleren Körper.
Die quantitative Formulierung dieses Satzes stellt den **„Zweiten Hauptsatz der Wärmelehre"** dar **(Kapitel 9.1.2)**.

Merk & Würdig

- **Energieerhaltung:** Auch im Zusammenhang mit Wärme gilt der Energieerhaltungssatz: Wird Wärme unerwünscht freigesetzt oder ist Wärme nicht mehr „nutzbar", dann spricht man von Energie- oder Wärmeverlusten.
- **Umwandlung von Energiearten:** Man beobachtet, dass Wärmeverluste dann vorliegen, wenn Energiearten ineinander umgewandelt werden.
- Verschiedenste Energieformen können in Wärme umgewandelt werden. Die Rückumwandlung von Wärme in verschiedene Energieformen ist nur sehr bedingt möglich.
- **Exotherme Prozesse (Reaktionen)** sind physikalische oder chemische Prozesse, bei denen Energie in Form von Wärme frei wird.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über Wärme als Energie.

Ü 7.4 Finde die Lösungswörter und du erhältst im blau unterlegten Feld einen Begriff aus der Thermodynamik.

1. Nicht nur Feuer wird gelöscht.
2. Das muss jedes Fahrzeug mindestens einmal machen.
3. Hört sich nach Silvester an – ist aber nur im Chemielabor sicher.
4. Das ist die Energieumwandlung nicht immer.
5. Hat immer mit Normalen zu tun.
6. Hat im Herbst und im Keller Hochsaison.

				1 K			K				
		2 B						N			
	3 K							S			
		4 R									L
		5 R						G			
6 G					G						

Zum Lösen der beiden folgenden Übungen brauchst du die spezifische Wärmekapazität von **Band 1** und den Energieerhaltungssatz.

Ü 7.5 1 kg Eisen fällt aus 500 m zu Boden. 50 % der frei werdenden Energie wird als Wärme frei.
Um wie viel steigt die Temperatur des Eisens?

Ü 7. 6 Erkläre mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität den Unterschied zwischen ozeanischem und kontinentalem Klima.

7.2.2 Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten und Festkörpern[1] *(specific heat capacity of liquids and solids)*

Um die Temperatur eines Körpers zu erhöhen, muss seine **Innere Energie** vergrößert werden. Die Bestimmung der Wärme, die in einen Körper hineinfließt, ermöglicht es, auch auf diese Wärmemenge zu schließen.

Das Experiment **(Abb. 114.1)** zeigt, dass bei Zufuhr von Wärme die Temperatur steigt.

Die zugeführte Energie Q ist proportional zum Temperaturanstieg ΔT und zur Masse m der erwärmten Stoffmenge **(Abb. 114.2)**. Allerdings beobachtet man, dass sich unterschiedliche Stoffe unterschiedlich leicht erwärmen lassen. Dies wird durch eine Stoffkonstante c (spezifische Wärmekapazität oder kurz: spezifische Wärme) ausgedrückt.

Man kann also anschreiben: $\mathbf{Q = m \cdot c \cdot \Delta T}$

Darin ist die spezifische Wärmekapazität c jene Energiemenge, die man benötigt, um 1 kg eines Stoffes um 1 °C zu erwärmen. Ihre Einheit ist J/(kgK) oder J/(kg°C). Benötigt man nur den Zusammenhang zwischen der „gespeicherten" Wärme und der Temperaturerhöhung, dann wird das Produkt „Masse mal spezifische Wärmekapazität" zusammengefasst: $\mathbf{C = m \cdot c}$

C wird Wärmekapazität genannt. Es ergibt sich damit: $C = Q/\Delta T$[2]

Abb. 114.1 *Temperaturerhöhung durch Wärmezufuhr*

Merk & Würdig

$\mathbf{Q = m \cdot c \cdot \Delta T}$

c … spezifische Wärmekapazität, *[c] = J/kgK*
m … erwärmte Masse, *[m] = kg*
ΔT … Temperaturdifferenz, *[ΔT] = K*
Q … zugeführte Wärme, *[Q] = J*

Stoff	c	Stoff	c
Wasser	4,18	Beton	0,75 – 1,05
Aluminium	0,90	Holz	etwa 1,76
Eis	2,05	Kupfer	0,38
Eisen	0,46	Gold	0,13
Ziegel	0,92	Polyäthylen	0,0025

Tab. 114.1 *Spez. Wärmekapazität (in kJ/kgK)*

Experiment

Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

In einem thermisch gut isolierten Gefäß wird einer bestimmten Menge Wasser mit Hilfe eines elektrischen Heizstabes Wärme zugeführt. Diese Energie kann über Strom-, Spannungs- und Zeitmessung bestimmt werden:

Spannung: U = 235 V; Stromstärke: I = 0,68 A; Zeitdifferenz: Δt = 73,3 s

$Q = P \cdot \Delta t = U \cdot I \cdot \Delta t = 235\ V \cdot 0{,}68\ A \cdot 73{,}3\ s = 11{,}7\ kJ$

Die Wassermenge m = 0,2 kg erwärmt sich in dieser Zeit von

10,2 °C auf 24,1 °C um 13,9 °C (= 13,9 K).

Wird mehr Energie zugeführt, dann wird diese Temperaturdifferenz größer. Stellt man $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ auf die spezifische Wärme c um und setzt die Wärme Q ein, ergibt sich:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{11{,}7\ kJ}{0{,}2\ kg \cdot 13{,}9\ K} = 4{,}2\ kJ/(kg \cdot K)$$

Für Wasser im flüssigen Zustand ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$\mathbf{c = 4{,}2\ kJ/(kg \cdot K)}$

Wird das Experiment beispielsweise mit Quecksilber durchgeführt, dann ergibt sich eine weitaus kleinere spezifische Wärme von 0,14 kJ/(kg · K).

Hinweis: Die Energie zur Erwärmung des Kalorimeters wurde in der Rechnung nicht beachtet.

Abb. 114.2 ***Experiment mit Kalorimeter.*** *Das Rührwerk ermöglicht eine gleichmäßige Erwärmung der gesamten Wassermenge. Das Experiment ist auch geeignet, um die spezifische Wärme von festen Körpern zu bestimmen. Diese werden im Wasser erwärmt.*

[1] Bereits in **Band 1** wurde kurz auf die spezifische Wärmekapazität eingegangen.
[2] Die Ähnlichkeit mit dem Begriff „Kapazität eines Kondensators" aus dem Bereich der Elektrotechnik ist kein Zufall; auch dort ist dieser Ausdruck ein Maß für die Fähigkeit, Energie zu speichern.

Beispiel 7.1

Swimmingpool

a) Welche Energie ist notwendig, um das Wasser eines 4 m breiten, 7 m langen und 2 m tiefen, voll gefüllten Schwimmbeckens von 10 °C auf 26 °C zu erwärmen?

b) Wie viel Tage benötigt der Aufheizvorgang?
Als Energiequelle dient ein 8 m^2 großer Sonnenkollektor **(Abb. 115.1)**.
(Laut Angabe der meteorologischen Zentralanstalt kann beispielsweise für Graz im August im langjährigen Mittel mit einer Einstrahlung von 5 kWh pro Tag normal auf eine Fläche von 1 m^2 gerechnet werden.)

a) Dem Volumen von $V = 56\ m^3$ Wasser entspricht eine Masse von
$m = \rho \cdot V = 1\,000\ kg/m^3 \cdot 56\ m^3 = 56 \cdot 10^3\ kg$
Die Wärme Q errechnet sich dann mit:
$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 56 \cdot 10^3\ kg \cdot 4{,}18\ kJ/(kg \cdot K) \cdot 16\ K = \mathbf{3{,}75 \cdot 10^9\ J}$

b) Der Wärme Q = 3,75 GJ entsprechen 1 042 kWh.
Der Sonnenkollektor stellt pro Tag eine Energie von 8 mal 5 kWh zur Verfügung.
Die Wärme Q dividiert durch 40 kWh pro Tag ergibt **26 Tage** Aufheizzeit.

Abb. 115.1 *Solarabsorber*

Beispiel 7.2

Wärmespeichervermögen: Beton gegen Luft

Die spezifische Wärmekapazität von Beton ist $c = 1\ kJ/(kg \cdot K)$, für Luft rechnet man mit $c = 0{,}97\ kJ/(kg \cdot K)$.

Die Dichte von Luft kann mit 1,3 kg/m^3 angenommen werden und die von Beton mit 2 400 kg/m^3.

a) Es ist die Wärmekapazität von Luft mit der von Beton für ein Volumen von $V = 1\ m^3$ zu vergleichen.

b) Um wie viel °C steigt jeweils die Temperatur bei einer Zufuhr von 100 Wh Wärme?

a) Luft:
$C = m \cdot c = \rho \cdot V \cdot c = 1{,}3\ kg/m^3 \cdot 1\ m^3 \cdot 0{,}97\ kJ/(kgK) = \mathbf{1{,}26\ kJ/K}$
Beton:
$C = m \cdot c = \rho \cdot V \cdot c = 2\,400\ kg/m^3 \cdot 1\ m^3 \cdot 1\ kJ/(kgK) = \mathbf{2{,}4\ MJ/K}$

b) Die Temperatur erhöht sich bei einer Wärmezufuhr von 100 Wh

bei Luft: $\Delta T = \frac{Q}{C} = \frac{100\ W \cdot 3\,600\ s}{1{,}26\ kJ/kgK} = \mathbf{286\ °C}$

bei Beton: $\Delta T = \frac{100\ W \cdot 3\,600\ s}{2{,}4\ MJ/kgK} = \mathbf{0{,}15\ °C}$

Hinweis: Die Luft wird sich in der Praxis kaum um 286 °C erwärmen. Viele Einflüsse, vor allem Wärmeabstrahlung und Konvektion, werden das verhindern.

Tag

Nacht

Abb. 115.2 *Passive Sonnenenergienutzung: Die massereiche Wand speichert tagsüber Sonnenenergie und gibt die Wärme nachts ab. Dies spart Heizkosten. Auch Temperaturschwankungen fallen nicht so gravierend aus.*

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du deine Kenntnisse über die spezifische Wärmekapazität überprüfen.

Ü 7.7 Für ein **Vollbad** werden 220 Liter Wasser von 10 °C auf 37 °C aufgewärmt.

a) Welche Energie ist dazu notwendig?

b) Wie teuer kommt dieses Bad, wenn für 1 m^3 Kaltwasser 90 Cent zu bezahlen sind und die Kilowattstunde 15 Cent kostet?

Ü 7.8 Ein Pkw mit einer Masse von 1,8 t fährt mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h.

a) Welche Wärmemenge wird beim Abbremsen bis zum Stillstand frei, wenn die gesamte kinetische Energie in Wärme umgewandelt wird?

b) Bremsscheiben: Angenommen, alle vier Bremsscheiben werden von 50 % dieser Energie aufgeheizt. Welche Temperatur erreichen sie? (Ausgangstemperatur 30 °C, Gesamtmasse der Bremsscheiben: 2,8 kg, Spezifische Wärme: 0,46 kJ/(kg · K)

c) Kocht das Kühlwasser? Angenommen, das Fahrzeug wird mittels Motorbremse gebremst und 50 % der frei werdenden Wärmemenge heizen das Kühlwasser auf. Welche Temperatur erreicht es? Ausgangstemperatur 60 °C, 12 Liter Wasser.

Ü 7.9 **Sonnenkollektor:** Die Wärmeleistung des Sonnenlichts beträgt etwa 400 W/m^2 Kollektorfläche. Wie groß muss die Kollektorfläche sein, wenn man nach einer Sonnenscheindauer von 8 Stunden ein Vollbad nehmen will? Für das Vollbad muss man 200 l Wasser von 12 °C auf 38 °C aufheizen.

Ü 7.10 Ein hoher Wert von c bedeutet:

- ☐ Man braucht viel Wärmeenergie, um das Material zu erhitzen.
- ☐ Es ist ein gute Wärmespeicher.
- ☐ Das Material ist teuer.
- ☐ Es fühlt sich kalt an.

Ü 7.11 *To warm up little pieces of* ***chocolate****, it is better to do it in a water bath. Calculate the energy which heats a hotplate (2 kW) within 2 minutes.*

a) *Which temperature does the chocolate (150g) obtain after 5 minutes without water? (c_{choco} = 3,1 kJ/(kgK), starting temperature of water and chocolate: 20 °C)*

b) *How high will the common temperature of chocolate and water (1/2 litre) be?*

Ü 7.12 ***A night storage heater*** *contains 60 kg of concrete. How much heat is required to warm the concrete from 10 °C to 40 °C? (Specific heat capacityof concrete: 0,8 kJ/kg·K)*

7.3 Phasenübergänge *(phase changes, phase transitions)*

Stoffe können in bestimmten Phasen[1] vorliegen. Die wichtigsten Phasen sind die Aggregatzustände **fest**, **flüssig** und **gasförmig**. Als „vierter Aggregatzustand" wird häufig **Plasma** (ionisiertes Gas) bezeichnet. Auch verschiedene Modifikationen von Festkörpern werden als Phasen bezeichnet: beispielsweise

- Diamant- oder Grafitstruktur des Kohlenstoffs
- fester Phosphor als weißer, roter oder schwarzer Phosphor

Übergänge zwischen zwei Aggregatzuständen nennt man Phasenübergänge.

Merk & Würdig

- **Verdampfen** ist der Übergang von flüssig zu gasförmig.
- **Sieden** ist Verdampfen bei der Siedetemperatur; diese ist druckabhängig.
- **Verdunsten** ist das Verdampfen unter der Siedetemperatur. Es findet nur an der Flüssigkeitsoberfläche statt.
- Als **Verdunstungskälte** bezeichnet man jene Wärmemenge, die beim Verdunsten der Umgebung entzogen wird.
- **Dampf** ist ein (durchsichtiges) Gas in der Nähe seiner Verflüssigung.
- **Dampfdruck:** In geschlossenen Gefäßen bildet sich über der Flüssigkeit durch austretende Gasteilchen ein Druck; dieser ist temperaturabhängig und volumsunabhängig.

Abb. 117.1 *Überblick über die Änderungen der Aggregatzustände*

7.3.1 Latente Wärme *(latent heat)*

Führt man einer Flüssigkeit bei konstantem Druck Wärme zu, dann steigt im Allgemeinen die Temperatur. Ab dem Siedepunkt führt aber weitere Wärmezufuhr nicht zu einer weiteren Temperaturerhöhung. Die Flüssigkeit verdampft. Es findet ein **Phasenübergang** *(phase change)* statt.

Die gesamte für die Umwandlung vom flüssigen in den gasförmigen Zustand nötige Wärme nennt man **Verdampfungswärme** *(latent heat of vaporization)*.

Umgekehrt führt ein Verflüssigen (Kondensieren) des Dampfs dazu, dass diese als **Kondensationswärme** wieder frei wird. (Deshalb kann man sich an heißem Dampf, der an der Haut kondensiert, besonders stark verbrennen. Die Kondensationswärme wird dabei an die Haut abgegeben).

Ähnlich sind die Verhältnisse beim Schmelzen, dafür muss **Schmelzwärme** *(latent heat of fusion)* zugeführt werden.

Im Allgemeinen bezeichnet man die Wärmemenge, die bei einem Phasenübergang auftritt, als **latente Wärme** *(latent heat)*[2]. Um die Verdampfungswärme bzw. die Schmelzwärme verschiedener Stoffe zu vergleichen, betrachtet man jeweils die latente Wärme bezogen auf 1 kg dieses Stoffes. Man spricht von der spezifischen Verdampfungswärme r bzw. der spezifischen Schmelzwärme q.

Abb. 117.2 *Phasenwechsel von Gusseisen: Flüssiges Metall wird in die Gussform gefüllt. Beim Erstarren kommt es zu einer Volumsreduktion (Schwund).*

Abb. 117.3 *Führt man einem System Wärme zu, dann steigt die Temperatur. Bei einem Phasenübergang wird die zugeführte Wärme als latente Wärme gespeichert. Insgesamt erhöht sich die Innere Energie des Systems.*

[1] In der Wärmelehre versteht man unter Phase einen gleichartig (homogen) aufgebauten Teil eines Systems.

[2] Latent (= verborgen); Wärme wird zugeführt, ohne dass sich die Temperatur erhöht.

Experiment

In einem Kalorimeter wird unterkühltes, zerhacktes Eis mit einem Heizstab gleichmäßig erwärmt. Zuerst steigt die Temperatur. Bei 0 °C ist keine weitere Temperaturerhöhung feststellbar. Die Wärmezufuhr führt zum Schmelzen.

Das Wasser-Eis-Gemisch hat so lange 0 °C, bis alles Eis geschmolzen ist. Erst danach steigt die Temperatur des Wassers, so wie im **Aufheizdiagramm** dargestellt **(Abb. 118.1)**.

Bei etwa 100 °C beginnt das Wasser zu verdampfen. Auch hier bleibt die Temperatur auf diesem thermischen Sattelpunkt konstant, bis alles Wasser verdampft ist.

Misst man die für den Vorgang benötigte Zeit, kann bei konstanter Leistung des Heizstabs die zugeführte Energie über $Q = P \cdot t$ ermittelt werden.

Man erkennt, dass allein für den Verdampfungsvorgang mehr als doppelt so viel Energie nötig ist als für das Schmelzen und Aufwärmen auf 100 °C.

Abb. 118.1 ***Aufheizdiagramm*** *für 1 kg Wasser. Das Aufheizdiagramm wird beim Abkühlen von rechts nach links durchlaufen.*

Stoff	spezifische Schmelzwärme (in kJ/kg)	spezifische Verdampfungswärme (in kJ/kg)
H_2O	332,4	2 257,1
O_2	13,8	214
He		21
Al	356	≈ 11 000
Fe	272,1	6 364
Au	67	1 758

Tab. 118.1

Merk & Würdig

- Unter der **spezifischen Verdampfungswärme r** versteht man die Wärme, die man zum Verdampfen von 1 kg eines Stoffs benötigt.

  Verdampfungswärme Q: $Q = m \cdot r$

  Schmelzwärme Q: $Q = m \cdot q$

  r … spezifische Verdampfungswärme, *[r] = J/kg*
  q … spezifische Schmelzwärme; *[q] = J/kg*
  m … Masse; *[m] = kg*

- Die geschilderten Vorgänge sind umkehrbar. Beim Kondensieren wird die Verdampfungswärme als Kondensationswärme wieder frei. Beim Erstarren wird die Schmelzwärme frei.

Beispiel 7.3

„Geld oder Leben"

a) Wie viel Energie ist notwendig, um einen Schneemann vollständig zu schmelzen?
Mittlere Ausgangstemperatur –5 °C; m = 600 kg
c_{Eis} = 2,09 kJ/(kgK); q = 332,4 kJ/kg

b) Wie lang dauert das mit einem 800 W-Haarfön?

c) Welche Energie wäre notwendig, um das Wasser auf 100 °C zu erwärmen und es vollständig zu verdampfen? r = 2257,1 kJ/kg

Abb. 118.2 *„Geld oder Leben"*

a) Die Energie setzt sich zusammen aus der Wärmemenge Q_1, die benötigt wird, um das Eis um 5 °C zu erwärmen, und aus der Schmelzwärme Q_2:

$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta T = 600\text{ kg} \cdot 2{,}09\text{ kJ/kgK} \cdot 5\text{K} = 6{,}27\text{ MJ}$ $\quad Q_2 = m \cdot q = 600\text{ kg} \cdot 332{,}4\text{ kJ/kg} = 199{,}4\text{ MJ}$

$Q = Q_1 + Q_2 = \mathbf{205{,}67\ MJ}$

Der weitaus größere Energieanteil ist die Schmelzwärme!

b) $P = \frac{Q}{t} \Rightarrow t = \frac{Q}{P} = \frac{206\text{ MJ}}{800\text{ W}} = 71{,}5\text{ h}$

Um den Schneemann zu schmelzen, benötigt der „Bösewicht" mit dem Haarfön etwa **3 Tage**.

c) Erwärmung des Wassers von 0 °C auf 100 °C: $Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta T = 600\text{ kg} \cdot 4{,}2\text{ kJ/kgK} \cdot 100\text{ K} = 252\text{ MJ}$

Vollständiges Verdampfen: $Q_4 = m \cdot r = 600\text{ kg} \cdot 2\,257{,}1\text{ kJ/kg} = 1\,354\text{ MJ}$

Gesamtenergie: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 =$ **1,8 GJ**

Um den Schneemann zu verdampfen sind 1,8 GJ notwendig; mit dem Haarfön würde der „Bösewicht" dafür fast ein Monat Zeit benötigen.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du deine Kenntnisse über die latente Wärme überprüfen.
Für die Übungen benutze die Tabellen 114.1 und 118.1.

Ü 7.13 Welche Wärmemenge ist erforderlich, um 5 kg Eis (–20 °C)

a) zum Sieden bei 100 °C und

b) zum vollständigen Verdampfen zu bringen?

Ü 7.14 **„It's cool"** – Sonny´s Gartenparty soll „cool" werden. Damit auch die Getränke kühl genug sind, serviert Sonny die Getränke mit Eiswürfel. Wie viele Eiswürfel (0 °C) zu je 13 Gramm sind notwendig, um ¼ Liter Fruchtsaft von 25 °C auf 0 °C abzukühlen? ($c_{Fruchtsaft} = c_{Wasser}$)

Ü 7.15 **Getränkedose:**

a) Berechne die Energie, die notwendig ist, um eine Aluminiumdose (17 g) aus Altmetall herzustellen. (Aufwärmen von 20 °C auf Schmelzpunkt und Schmelzen)

b) Rechnet man die Roh-Aluminium-Produktion mit ein (in der Praxis funktioniert das Dosenrecycling nicht optimal!), dann ist pro Dose ein Energieaufwand von 0,9 kWh anzusetzen. Wie viele Tassen Kaffee könnte man damit kochen? (Eine Tasse Kaffee: 0,2 Liter Wasser müssen von 20 °C auf 80 °C erwärmt werden.)

Ü 7.16 Man fröstelt, wenn man aus dem Wasser steigt; auch im Sommer am Strand. Kannst du erklären, warum?

Ü 7.17 **Kondensator:** In einer Dampfturbine wird auch latente Wärme, die im Dampf enthalten ist, genützt. Dampf wird im so genannten Kondensator (condensare, lat. Verdichten) durch Kühlung mittels Kühlwasser kondensiert. In der Folge entsteht ein Unterdruck, der den Dampf sozusagen durch die Turbine „saugt" und den Wirkungsgrad etwas erhöht. In einem 900-MW-Kraftwerk werden pro Sekunde 183 kg Dampf im Kondensator kondensiert. Welche Gesamtleistung steckt in diesem Dampf?

Ü 7.18 Warum sollst du Speiseeis in Papier wickeln, wenn du es erst zu Hause essen willst?

☐ Damit es niemand sieht.

☐ Damit es länger gefroren bleibt.

☐ Damit man es besser tragen kann.

Begründe physikalisch!

Ü 7.19 *„I thought you turned off the heat"*

a) *How many joules (and kWh) are needed to melt the ice without making it hotter? Mass of igloo-ice: 5 000 kg; starting temperature: 0 °C*

b) *How long does this process of melting take with a 2-kW-heater?*

7.3.2 Kleine Physik des Wassers *(a little bit of physics about water)*

Anomalie des Wassers

Wasser hat ein vom normalen Dichte-Temperatur-Zusammenhang abweichendes Verhalten:

Bei den meisten Stoffen nimmt die Dichte mit abnehmender Temperatur zu. Bei Wasser ist dies nur oberhalb von 4 °C der Fall. Erniedrigt man die Temperatur von 4 °C bis zum Gefrierpunkt (Abb. 119.1), kann man eine Abnahme der Dichte und somit eine Volumszunahme feststellen. Dies nennt man **Anomalie des Wassers** *(anomaly of water)*.

Neben dem Dichtemaximum bei 4 °C kann Wasser noch mit einer weiteren Besonderheit aufwarten: Beim Übergang vom flüssigen (Wasser) in den festen Zustand (Eis) nimmt die Dichte sprunghaft ab. In einem stehenden Gewässer stellt sich daher eine Temperaturschichtung ein. Wasser mit einer Temperatur von 4 °C sinkt wegen der größten Dichte auf den Boden. Darüber sind die Schichten geringerer Dichte. Infolge dieser Eigenschaft gefriert in stehenden Gewässern im Winter das Wasser zunächst an der Oberfläche; die Eisschicht wirkt als Isolierung; unter der Eisdecke bleibt das Wasser flüssig.

Abb. 119.1 *Temperaturabhängigkeit des Volumens von 1 kg Wasser*

Abb. 120.1

Abb. 120.2 *Wasser, links im eisförmigen Zustand, die 6-eckige Kristallstruktur ist erkennbar; rechts flüssig (bei 4 °C), hier sind die Moleküle dichter gepackt.*

Erst bei Erwärmung über 4 °C verringert sich wieder die Packungsdichte auf Grund der Wärmebewegung, so wie bei den meisten Stoffen.

Hätte auch Eis eine höhere Dichte als Wasser, würde das Eis absinken und Gewässer würden vollständig zufrieren. Dass das nicht der Fall ist, ist für das Leben im Wasser von entscheidender Bedeutung. Das Bild der alpinen Berg- und Felslandschaft wäre ganz anders; es gäbe keine Erosion durch Frost.

Übungen

In der folgenden Übung befasst du dich mit der Auswirkung der Anomalie des Wassers auf unsere Umwelt.

Ü 7.20 **a)** Führe folgendes Experiment durch: Lege einen Stein eine Stunde ins Wasser und anschließend ins Tiefkühlfach. Wiederhole diesen Vorgang mehrere Male. Beobachte den mehrmaligen Tau- und Gefriervorgang. Denk daran, wie oft ein Gebirge diesen Wechsel bereits erlebt hat. Das „Ur"-Waldviertel wurde vor 250 Millionen Jahren, die Alpen vor 30 Millionen Jahren aufgefaltet. Wie würde das Waldviertel ohne Anomalie des Wassers aussehen? Diskutiere mit deiner Geographielehrkraft darüber.

b) Was bedeutet die Anomalie für die Natur noch? Lasse deiner Phantasie freien Lauf und überlege, welche Konsequenzen die Anomalie des Wassers für das Leben auf der Erde hat.

Merk & Würdig

Werte für Wasser

Kritische Temperatur *(critical temperature)*: 374,15°C

Tripelpunkt *(triple point)*:
T_k = 273,15 K = 0,01°C
p_k = 0,61 kPa

Der Tripelpunkt wird im SI zur Festlegung der Einheit 1 Kelvin verwendet.

Phasendiagramm des Wassers

In einem derartigen Diagramm kann man ablesen, in welcher Phase sich ein Stoff bei gegebenem Druck und Temperatur befindet. Es wird auch **Zustandsdiagramm** genannt **(Abb. 120.3)**.

- Die so genannte **Dampfdruckkurve** beschreibt den Übergang gasförmig zu flüssig.
- Die **Sublimationskurve** gibt den direkten Übergang vom festen zum dampfförmigen Zustand bei sehr niederem Druck wieder.

  Hinweis: Eis kann allerdings auch schon bei normalem Luftdruck in gasförmigen Zustand übergehen – aus demselben Grund, aus dem Wasser unterhalb des Siedepunkts verdunstet. So trocknet Wäsche auch bei Frost. Umgekehrt kann Wasser zu Eis auch bei Luftdruck resublimieren, wie die Reifbildung zeigt.
- **Die Schmelzkurve** verbindet jene Druck- und Temperaturwerte, bei denen ein fester Zustand schmilzt bzw. eine Flüssigkeit erstarrt.
  Direkt auf der Dampfdruck-, der Sublimations- und der Schmelzkurve liegt Wasser in jeweils zwei Phasen vor.
- **Tripelpunkt:** In diesem Punkt können alle drei Phasen des Wassers im Gleichgewicht vorliegen.
- **Kritischer Punkt:** Am Ende der Dampfdruckkurve verschmelzen die Eigenschaften des heißen Gases und der Flüssigkeit. Die Verdampfungswärme wird null. Eine Unterscheidung in Phasen ist daher nicht mehr sinnvoll.

Abb. 120.3 *Phasendiagramm des Wassers*

Übungen

Mit den folgenden Übungen kannst du lernen, das Phasendiagramm zu analysieren.

Ü 7.21 Klaus verblüfft seine Kameraden, als er bei einer Wanderung behauptet:
„Ich kann mit einer genauen Dampfdruckkurve für Wasser **(Abb. 120.3)** die Meereshöhe bestimmen!"

a) Ja, er kann es; aus Erfahrung, weil er den Weg schon oft gegangen ist.

b) Ja, er kann es; aber nur wenn er Wasser mit hat.

c) Nein, er gibt nur an.

d) Nein, er kann es nicht, da die Kurve nur für Dampf gilt.

Ü 7.22 **a)** Wasser siedet bei 100 °C bei normalem Luftdruck.
Bei höherem Luftdruck siedet Wasser bei

- ☐ höherer Temperatur
- ☐ niedrigerer Temperatur.

b) Wie ist es bei Wassereis? Wasser gefriert bei 0°C.
Bei höherem Luftdruck schmilzt Eis bei

- ☐ höherer Temperatur
- ☐ niedrigerer Temperatur.

7.3.3 Heizwert *(heating value)*

Bei der Verbrennung wird Wärme frei. Wie viel Wärme freigesetzt wird, hängt vor allem vom so genannten **Heizwert H** ab. Für die wichtigsten Energieträger hat man die bei der Verbrennung frei werdende Energie unter kontrollierten Bedingungen experimentell ermittelt. Diese Wärme wird auf die Masse oder das Volumen des Brennmaterials bezogen.

Der **obere Heizwert H_o** *(higher heating value – HHV)*[1] wird auch **Brennwert** genannt **(Tabelle 121.1)**. Neben dem oberen Heizwert H_o (oder Brennwert) ist auch noch der **untere Heizwert H_u** (kurz „Heizwert", *lower heating value – LHV*)[2] definiert. Dieser ist kleiner und unterscheidet sich durch die Verdampfungswärme, **Kapitel 7.3.1**). Der Brennwert (oberer Heizwert) ist die Verbrennungswärme, die bei der vollständigen Verbrennung von 1 kg des Stoffs maximal frei werden kann.

	Dichte	H_u	H_o	H_o
Heizöl leicht	0,96 kg/dm³	38,5 MJ/l	40 MJ/kg	41,6 MJ/kg
Erdgas	0,71 kg/m³	34,6 MJ/m³	48,6 MJ/kg	39,9 MJ/m³
Wasserstoff	0,09 kg/m³	10,8 MJ/m³	120 MJ/kg	
Holz-Pellets	1,00 kg/dm³	17,6 MJ/kg	17,6 MJ/kg	
Buche	573 kg/rm	8 650 MJ/rm	15,1 MJ/kg	

Tab. 121.1 ***Oberer Heizwert H_o*** *und* ***unterer Heizwert H_u*** *einiger Energieträger (Dichte der Gase bei 0 °C und 1 bar)*

Abb. 121.1 *Ein Zündholz, das vollständig abbrennt, setzt ungefähr 2 kJ Energie frei.*

Merk & Würdig

Wärme und Heizwert
$$Q = m \cdot H$$
(für Festkörper und Flüssigkeiten)
$$Q = V \cdot H$$
(für Gase)

Q … Wärme, *[Q] = J*
m …Masse, *[m] = kg*
V … Volumen, *[V] = m³*
H … Heizwert, *[H] = J/kg*

[1] **H_o** … auch Verbrennungswärme; bei ihr wird nicht berücksichtigt, dass für das Verdampfen von Wasser ein Teil der Wärmeenergie notwendig ist.
[2] **H_u** … Es wird ein Teil der Wärmeenergie für das Verdampfen von Wasser abgezogen.

Beispiel 7.4

Vergleich: Heizen mit Holz und mit Erdgas

Es sollen die reinen Verbrauchskosten beim Heizen eines Einfamilienhauses mit zwei verschiedenen Energieträgern verglichen werden. Das (durchschnittlich isolierte) Haus mit 150 m^2 Wohnfläche benötigt im Vergleichsjahr 30 MWh Energie.

a) Wie viel m^3 Gas bzw. wie viel Raummeter Buchenholz sind dafür aufzubringen?

b) Wie hoch sind die jährlichen Kosten, wenn für den Raummeter Holz 120 € und für den m^3 Gas 60 Cent zu bezahlen sind?

a) Der Energie 30 MWh entspricht $108 \cdot 10^3$ MJ. Setzt man aus der **Tabelle 121.1** für Erdgas $H_u = 34{,}6\ MJ/m^3$ und für Buchenholz $H_u = 8\,650$ MJ/rm, ein ergibt sich:

Erdgasverbrauch: $Q = V \cdot H_u \Rightarrow V = \frac{Q}{H_u} = \frac{108 \cdot 10^3\ MJ}{34{,}6\ MJ/m^3} = \mathbf{3\,121\ m^3}$

Holzverbrauch: $Q = V \cdot H_u \Rightarrow V = \frac{Q}{H_u} = \frac{108 \cdot 10^3\ MJ}{8\,650\ MJ/rm} = \mathbf{12{,}5\ rm}$

b) Energiekosten **Erdgas: 1 873 €**

Energiekosten **Holz: ca. 1 500 €**

Bemerkung: Ob der Bewohner für die höhere Bequemlichkeit der Gasheizung auch die höheren Verbrauchskosten in Kauf nimmt, das ist eine andere Frage.

Abb. 122.1

Ergänzung & Ausblick

Auch der menschliche Körper bezieht die Energie aus chemischer Energie.

Der **physiologische Brennwert** beschreibt die frei werdende Energie bei der Verbrennung von Nährstoffen.

Bei den Hauptnährstoffen beträgt der Brennwert:

Physiologischer Brennwert	
Kohlehydrate	17 MJ/kg
Fett	38 MJ/kg
Eiweiß	17 MJ/kg

Tab. 122.1

Um 10 dag reinen Zucker zu verbrennen sind 74,4 l O_2 notwendig. Dabei werden 1 600 kJ frei.

Richtige Ernährung ist ein Bilanzproblem. Nährstoffangebot und Nährstoffverbrauch müssen im Gleichgewicht sein.

Beispiel 7.5

Energiebedarf eines Menschen

Dieser ist abhängig von Gewicht, Alter und Arbeitsintensität. Sogar beim „Nichtstun" benötigt ein etwa 60 kg schwerer Mensch 80 W Leistung.

a) Welche Energie benötigt solch ein „Faulenzer" pro Tag?

b) Welche Menge reiner Kohlehydrate (Brennwert 17 MJ/kg) müssten damit pro Tag aufgenommen werden, um die Körperfunktionen aufrechtzuerhalten? Wie vielen Portionen Hamburger (Normal-Portion: 1 140 kJ) entspricht dies?

Abb. 122.2 *Energiebedarf eines Menschen pro Stunde*

a) Wärmemenge $Q = P \cdot t = 80\ W \cdot 24 \cdot 3600\ s = \mathbf{6{,}9\ MJ}$

b) $m = \frac{6{,}9\ MJ}{17\ MJ/kg}$, das sind 400 g reine Kohlehydrate, bzw.

$\frac{6{,}9\ MJ}{1{,}14\ MJ} = 6{,}1$, also etwa **6 Hamburger**.

Beachte: Die Nahrungsaufnahme dient nicht nur zur Energieversorgung des Körpers! Salze, Vitamine, Spurenelemente und Wasser sind für viele Körperfunktionen notwendig und daher lebenswichtig!

Mit 1 kcal = 4,2 kJ kann man[1)]
- 1 kg H_2O um 1 °C erwärmen
- 1 kg 418 m hoch heben
- 1 kg auf 329 km/h beschleunigen

1) Siehe **Band 1, Kapitel 2.3.2**

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du deine Kenntnisse über den Heizwert überprüfen.

Ü 7.23 Wie viel Liter Heizöl sind notwendig, um eine Wohnung einen Winter lang zu heizen?

Der Energieverbrauch liegt für eine Heizsaison bei 10 MWh. Der Heizwert beträgt 40 MJ/kg.
Die Dichte von Heizöl ist 0,95 kg/dm^3.

Ü 7.24 **Müllverbrennung I:** Ein Wiener Haushalt produziert im Jahr durchschnittlich 1 t Müll.

Die Hälfte davon wird thermisch entsorgt. Wie groß ist die thermische Energie bezogen auf einen Haushalt?
Der Heizwert von Restmüll liegt bei 10 MJ/kg.

Bemerkung: Trotz dieser großen Energieausbeute sollte Müll doch vermieden werden, schließlich erhöht Müllverbrennung (aber auch eine Mülldeponie) den Gehalt an Treibhausgasen wie CO_2 (bzw. Methan) in der Atmosphäre. Das Argument, dass große Mengen schädlicher Abgase freigesetzt werden, ist allerdings aufgrund immer besserer Filtertechnologie weniger stichhaltig.

Ü 7.25 **Müllverbrennung II:** Hausmüll enthält etwa 10 % (Gewichtsprozent) Kunststoffanteil.

Der Heizwert dieses Kunststoffgemischs ist größer als der von Heizöl! (ca. 45 MJ/kg).

Wird dieser Kunststoffanteil durch Mülltrennung aussortiert, dann muss nahezu die gesamte fehlende Energie bei der Müllverbrennung durch Zusatzheizung (Gasbrenner) ersetzt werden.

a) Welche thermische Energie enthält dieser Kunststoffanteil pro Tonne Hausmüll?

b) Welche Menge Erdgas (in m^3) müsste pro Tonne Müll zusätzlich verbrannt werden, um den Energiegehalt des aussortierten Kunststoffs zu kompensieren? (Heizwert Erdgas: 49 MJ/kg; Dichte: 0,71 kg/m^3)

Ü 7.26 ***(h)eating:*** *Your body uses about 20 kJ every minute for making the bed or dancing.*

a) *How much megajoules does it need if you dance one hour?*

b) *To get this energy from eating only carrots, how many kilograms does it need? (The calorific value of carrots is 2 MJ/kg.)*

c) *Calculate the power in watt you need for dancing.*

8 Das Verhalten von Gasen und die Gaskinetik

In diesem Kapitel geht es um

- **Ideale Gase**
- **Gasgesetze**
- **Gaskinetik**
- **Innere Energie**

In diesem Kapitel wird das Verhalten von Gasen *(performance of gases)* beschrieben, deren Zustände sich unter dem Einfluss von Wärme ändern, ohne die notwendige Energie für die Zustandsänderungen zu berücksichtigen.

Unter dem **Zustand** *(state)* eines Gases versteht man die Eigenschaften, die ein Gas während eines bestimmten Zeitpunkts besitzt. **Zustandsgrößen** nennt man jene (physikalischen) Größen, die ein Gas vollständig beschreiben. Es sind dies

- der **Druck p**
- das **Volumen V**
- die **Temperatur T** und
- die **Masse m** oder **Teilchenzahl N**.

Gleichungen, die diese Größen miteinander verknüpfen, nennt man **Zustandsgleichungen** *(equations of state)*

8.1 Das ideale Gas *(the ideal gas)*

Das **Modell** des idealen Gases beschreibt das Verhalten von Gasen in guter Näherung. Ein ideales Gas hat folgende Eigenschaften:

- Ein ideales Gas besteht aus gleichartigen Teilchen.
- Die Teilchen werden punktförmig angenommen. Sie haben kein Eigenvolumen.
- Die Bewegung der Teilchen ist ungeordnet (thermische Bewegung).
- Zusammenstöße zwischen Molekülen sowie zwischen Molekülen und der Wand des Gasbehälters sind rein elastisch.
- Abgesehen von den Stößen üben die Teilchen keine Kräfte aufeinander aus. (Auch der Einfluss der Gravitation auf die Gasteilchen wird vernachlässigt.)

Abb. 125.1 *Modell des idealen Gases: Die Teilchen wechselwirken nur durch elastische Stöße.*

8.2 Die allgemeine Gasgleichung *(general gas equation)*

Der Zustand eines Gases ist (zunächst) dann ausreichend beschrieben, wenn man den Druck p, seine Temperatur T und das Volumen V, in dem sich das Gas befindet, kennt. (Die Masse des Gases werden wir erst im **Kapitel 8.3** berücksichtigen. Bei den folgenden Überlegungen ist die Masse daher konstant.) Bringt man nun ein Gas von einem Zustand (p_1, T_1, V_1) in einen anderen (p_2, T_2, V_2), so hat sich gezeigt, dass der Ausdruck $\frac{p \cdot V}{T}$ für alle Zustände, die das Gas durchläuft, gleich ist.

Man schreibt daher: $\frac{p \cdot V}{T} = \text{const}$

Diese Gleichung nennt man **allgemeine Gasgleichung** oder **ideales Gasgesetz** *(ideal gas law)*.
Im Folgenden werden Sonderfälle der allgemeinen Gasgleichung behandelt.

Merk & Würdig

Allgemeine Gasgleichung

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const}$$

p … Druck, *[p] = Pa*
V … Volumen, *[V] = m³*
T … Temperatur, *[T] = K*

8.2.1 Das Gesetz von Charles

Bei diesem Gesetz verändert man den Druck nicht, er bleibt konstant: p = const; daraus folgt $\frac{V}{T} = \text{const}$

Eine derartige Zustandsänderung nennt man **isobar**. CHARLES[1] benutzte das Gesetz, um den Ausdehnungskoeffizienten für Luft zu bestimmen. Er stellte fest, dass dieser Wert für fast alle Gase zutrifft **(Tabelle 125.1)**.

Ausdehnungskoeffizienten γ	
Gas	γ in $10^{-4} \cdot K^{-1}$
Ar	36,76
He	36,6
CO_2	37,26
Luft	36,75
O_2	36,61
N_2	36,74
H_2	36,62

Tab. 125.1

[1] Der im englischsprachigen Raum gebräuchliche Name für dieses Gesetz setzt sich auch immer mehr international durch. In älteren Büchern wird das Gesetz nach GAY-LUSSAC benannt. Jacques Alexandre César CHARLES (1746 – 1823), französischer Physiker. 1783, noch vor GAY-LUSSAC, erreichte er in einem mit Wasserstoff gefüllten Ballon fast 3 km Höhe, um die Atmosphäre zu untersuchen.

Merk & Würdig

Isobare Zustandsänderung

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

V … Volumen, [V] = m³
T … Temperatur, [T] = K

Die Gleichung $\frac{V}{T} = \text{const.}$ kann man zusammen mit der Beziehung für die Volumsausdehnung $V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\vartheta)$, die in **Band 1** vorgestellt wurde, auch als $\frac{V_0}{273\ °C} = \frac{V}{T}$ mit $\gamma = 36{,}75 \cdot 10^{-4}\ K^{-1} \approx \frac{1}{273} \cdot \frac{1}{K}$ anschreiben.

Ergänzung & Ausblick

Zeichnet man das V-ϑ-Diagramm, so erhält man Isobare **(Abb.126.1** und **126.2)**.

Eine lineare Extrapolation zu tiefen Temperaturen ergibt einen Schnittpunkt mit der Temperaturachse bei ungefähr –273,15 °C.

Bemerkung: Daraus auf den absoluten Tiefpunkt der Temperatur zu schließen wäre aber vorschnell, da bei solchen Temperaturen die Funktion für die meisten Gase in diesem Bereich nicht existiert (Schließlich sind Stoffe in diesem Bereich nicht mehr gasförmig!).

Der absolute Nullpunkt der Temperatur von –273,15 °C liegt also eher zufällig so nahe an diesem Schnittpunkt.

Abb. 126.1

Abb. 126.2

Beispiel 8.1

Natrium reagiert sehr heftig mit Wasser unter Abgabe von Wasserstoff. Bei 10 °C werden 250 cm³ Wasserstoff mit einem Becherglas von einer Studentin der Chemie aufgefangen **(Abb. 126.3)**. Anschließend trägt sie das Becherglas in einen 25 °C warmen Raum. Wie groß muss das Becherglas mindestens sein?

Das Gefäß ist nicht geschlossen, daher liegt eine isobare Zustandsänderung vor.

Es gilt daher $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$; umformen auf $V_2 = T_2 \frac{V_1}{T_2} = 298\ K \cdot \frac{250\ cm^3}{283\ K} = \mathbf{263{,}3\ cm^3}$

Das Becherglas sollte ein Mindestvolumen von 270 cm³ haben, damit sicher kein Wasserstoff entweichen kann.

Abb. 126.3

Abb. 126.4 *p-T-Diagramm*

8.2.2 Das Gesetz von Gay-Lussac *(law of Gay-Lussac)*

Lässt man das Volumen V konstant, so erhält man eine **isochore Zustandsänderung.** Sie wird – in Analogie zu oben – wie folgt geschrieben:

$$\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{T}} = \textbf{const} \text{ oder } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

In einem p-T-Diagramm sind die Isochoren Geraden **(Abb. 126.4)**.

Beispiel 8.2

Eine absolut dicht schließende Metallbox ($V = 0{,}15\ m^3$) wird bei einer (Außen)-Temperatur von 20 °C geschlossen und sodann auf –20 °C abgekühlt. Welche Kraft ist zum Öffnen der Tür (Türfläche $A = 0{,}3\ m^2$) nötig? (Außendruck $p_1 = 101\,300$ Pa)

Da das Volumen sich nicht ändert, benützen wir die Gleichung $\frac{p}{T} = \text{const}$ in der Form $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$.

Daher ist $p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 101\,300\ \text{Pa} \cdot \frac{253\ \text{K}}{293\ \text{K}} = 87\,500\ \text{Pa}$.

Die Kraft zum Öffnen der Tür ergibt sich aus der Druckdifferenz und der Türfläche

$F = (p_2 - p_1) \cdot A = (101\,300\ \text{Pa} - 87\,500\ \text{Pa}) \cdot 0{,}3\ m^3 = 13\,800\ \text{Pa} \cdot 0{,}3\ m^2 = \mathbf{4\,140\ N}$

Diese Kraft ist so groß, dass die Tür von einem einzelnen Menschen nicht geöffnet werden kann.

Beachte, dass diese Kraft unabhängig von der Größe der Metallbox ist.

8.2.3 Das Gesetz von Boyle-Mariotte *(law of Boyle-Mariotte)*

Die Beziehung zwischen *p* und *V* eines Gases bei **konstanter Temperatur** (**isotherme Zustandsänderung**) wurden zum ersten Mal unabhängig voneinander von BOYLE[1] und MARIOTTE[2] gefunden. Das nach ihnen benannte Boyle-Mariotte-Gesetz besagt, dass (bei konstanter Temperatur) der Druck eines Gases dem Volumen indirekt proportional ist:

$$p \sim \frac{1}{V} \Rightarrow p \cdot V = \text{const}$$

oder: $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

Druck *p*

Isotherme sind im *p-V*-Diagramm gleichseitige Hyperbeln.

T = const

Volumen *V*

Abb. 127.1

Beispiel 8.3

Lisa spielt mit einem aufgeblasenen Luftballon ($V = 13\ dm^3$, $p = 1{,}2$ bar).
Es gelingt ihr, den Ballon in eine würfelförmige Schachtel (Seitenkante a = 20 cm) zu pressen. Auf welchen Druck steigt die Luft im Inneren des Ballons?
Die Temperatur soll unverändert bleiben.

Da T = const gilt, wenden wir das Boyle-Mariotte-Gesetz an.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \Rightarrow p_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{V_2} = \frac{1{,}2\ \text{bar} \cdot 13\ dm^2}{8\ dm^3} = \mathbf{1{,}95\ bar}$$

Ob der Ballon dieses „Experiment" aushält? Ob Lisa die Kraft aufbringt?

Abb. 127.2

Das Gesetz von	gilt für eine …	und lautet …	Bedingung	p-V-Diagramm
Charles	isobare Zustandsänderung	$\frac{V}{T} = \text{const}$	p = const	
Gay-Lussac	isochore Zustandsänderung	$\frac{p}{T} = \text{const}$	V = const	
Boyle – Mariotte	isotherme Zustandsänderung	$p \cdot V = \text{const}$	T = const	

Tab. 127.1

Merk & Würdig

Das allgemeine Gasgesetz

$$\frac{\mathbf{p \cdot V}}{\mathbf{T}} = \mathbf{const}$$

fasst die drei Sonderfälle zu einem Gesetz zusammen.

Die bisher besprochenen Gesetze gelten für ideale Gase (oder reale Gase bei geringem Druck und nicht zu tiefen Temperaturen).

[1] ROBERT BOYLE (1627, Lismore, Irland – 1691, London), englischer Physiker. Er isolierte als Erster Gase und entdeckte so das nach ihm benannte Gesetz. Er erkannte die Notwendigkeit objektiver Beobachtung und reproduzierbarer Experimente.

[2] EDME MARIOTTE (1620, Dijon – 1684, Paris), franz. Physiker. Ursprünglich Geistlicher, widmete er sich dann vor allem den Wettererscheinungen.

Ergänzung & Ausblick

Die drei besprochenen Zustandsänderungen (oder Iso-Prozesse) sind Sonderfälle des allgemeinen Gasgesetzes. Die Darstellung erfolgt in einem dreidimensionalen Koordinatensystem, in dem man die bekannten p-V- und p-T-Diagramme durch Projektion gewinnt.

- konstanter Druck
- konstantes Volumen
- konstante Temperatur

Abb. 128.1 *Dreidimensionale Darstellung der Zustandsfläche idealer Gase*

Beispiel 8.4

Durch Fäulnisprozesse entstehen am Grund eines Sees (Tiefe 30 m, t = 8 °C) Gase, die als Gasblasen (d = 1 cm) an die Oberfläche (t = 22 °C) aufsteigen. Auf welchen Durchmesser wächst die Gasblase?

Der Druck am Grund beträgt 4 bar (= 30 m Wassersäule + Luftdruck = 3 bar + 1 bar). Da wir annehmen, dass kein Gas in Wasser gelöst wird (Gärgasmasse konstant), benützen wir die allgemeine Gasgleichung.

Also:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} \Rightarrow \frac{\pi}{6} \cdot d_2^3 = \frac{p_1 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_1^3 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} \Rightarrow d_2 = \sqrt[3]{\frac{4\,\text{bar} \cdot (1\,\text{cm})^3 \cdot 295\,\text{K}}{281\,\text{K} \cdot 1\,\text{bar}}} = \mathbf{1{,}6\,cm}$$

Die Gärgasblase wächst auf einen Durchmesser von **16 mm**.

Übungen

Überprüfe zum Thema Gasgesetze deine Fähigkeiten mit folgenden Übungen:

Ü 8.1 Ein Jäger kommt an einem kalten Wintermorgen ($\vartheta = -15$ °C) zu seiner Blockhütte ($V = 150\ m^3$). Er heizt sofort ein und die Luft hat bald eine Temperatur von 18 °C erreicht. Berechne, wie viel Luft während des Erwärmens aus der Hütte entweicht

Ü 8.2 Ein Autofahrer stellt sein Fahrzeug an einem Wintermorgen ($\vartheta = -2$ °C) auf einem Parkplatz ab. Während des Tages erwärmt die Sonne die Reifen auf 20 °C. Welcher Reifendruck wird erreicht, wenn der ursprüngliche Reifendruck 1,8 bar betragen hat?
(Die Volumszunahme ist zu vernachlässigen.)

Ü 8.3 Berechne, welche Temperatur ein Gas annimmt, wenn man seinen Druck verdoppelt. Berechne unter der Voraussetzung, dass das Volumen konstant bleibt.

Ü 8.4 In einem luftdicht verschlossenen Behälter befindet sich ein Gas mit der Temperatur 0°C. Berechne, welche Temperaturzunahme notwendig ist, damit sich der Gasdruck verdoppelt.

Ü 8.5 Ein Gas nimmt bei einem Druck von 0,7 MPa und einer Temperatur von 15 °C ein Volumen von 900 Liter ein.

a) Wie groß ist der Druck bei 25 °C bei 800 Liter Volumen?

b) Wie groß ist das Volumen bei 0,5 MPa und 0 °C?

c) Wie groß ist Temperatur bei einem Druck von 1 bar und 1 m^3?

Übungen

Ü 8.6 Auf welche Temperatur (in °C) muss Luft gebracht werden (p = const.), damit das Volumen
a) verdoppelt, **b)** halbiert wird? Anfangstemperatur 0 °C

Ü 8.7 Ein Taucher besitzt ein Lungenvolumen von 6,6 Liter. Er taucht ohne Pressluftflasche auf eine Tiefe von 10 m. Die Temperatur bleibe konstant.
a) Wie groß ist der Druck in der Lunge des Tauchers?
b) Welches Lungenvolumen hat der Taucher in 10 m Tiefe?

Ü 8.8 Welche der folgenden Vorgänge kann als isotherme Zustandsänderung angesehen werden? Kreuze an!

	isotherm	nicht isotherm
a) Aus einer undichten Luftmatratze entweicht langsam die Luft.	☐	☐
b) Ein Fahrradschlauch wird rasch aufgepumpt.	☐	☐
c) Während einer Autobahnfahrt hat sich der Druck in den Autoreifen um 0,2 bar erhöht.	☐	☐
d) Einer kohlensäurehaltigen Wasserflasche entweicht schlagartig das Gas.	☐	☐

Ü 8.9 Zeichne das V-T-Diagramm der drei Iso-Prozesse:
a) isobar **b)** isochor **c)** isotherm

Ü 8.10 Leider ist dem Schüler Hugo Hektisch auf seine Arbeit Ketchup gespritzt, sodass er nicht alle Beschriftungen seiner Diagramme lesen kann.

a)

Abb. 129.1

b)

Abb. 129.2

Ergänze in **Abb. 129.1** und **Abb. 129.2** die fehlenden Beschriftungen in den Diagrammen.

Ü 8.11 Im Oktober 2012 fuhr Felix Baumgartner mit einem mit Helium gefüllten Ballon bis auf 36 000 m Höhe. Dabei dehnten sich die 5 000 m^3 Helium im Ballon am Erdboden in dieser Höhe auf 850 000 m^3 auf.
Ist dieser Vorgang
a) isotherm
b) isobar
c) isochor oder
d) keiner dieser drei Iso-Prozesse?
Erkläre auch, warum die einzelnen Prozesse zutreffen oder nicht zutreffen!

Ü 8.12 Woran erkennt man, dass das Gesetz von Charles nicht bei sehr tiefen Temperaturen gilt/gelten kann? Erkläre dies!

Ü 8.13 *A gas has a volume of 1,2 dm³ at 30 °C. What is its volume at 100 °C if its pressure remains constant?*

spezifische Gaskonstante	
Gas	R_s in J/kgK
Helium	2 167
Luft	289
Sauerstoff	270
Stickstoff	297
Wasserstoff	4 129

Tab. 130.1

8.3 Die Zustandsgleichung idealer Gase *(the Ideal Gas Law)*

Ausgehend von $\frac{p \cdot V}{T}$ kann man die Masse berücksichtigen und erhält
$p \cdot V = R_s \cdot m \cdot T$.
Die neu eingeführte Konstante **R_s – die spezifische Gaskonstante** – berücksichtigt die Eigenschaften eines Gases (mit $[R_s]$ = J/kgK).

Beispiel 8.5

In einer 50 Liter-Stahlflasche befinden sich 5 kg Sauerstoff bei 20° C. Wie groß ist der Druck im Inneren der Gasflasche?

Wir formen die Gleichung $p \cdot V = R_s \cdot m \cdot T$ geeignet um und erhalten

$$p = \frac{m \cdot R_s \cdot T}{V} = \frac{5\ \text{kg} \cdot 270\text{J/kgK} \cdot 293\ \text{K}}{0{,}05\ \text{m}^3} = 7\,911\,000\ \text{Pa}.$$

Es herrscht ein Innendruck von fast **8 MPa = 80 bar**.

Merk & Würdig

Definition von 1 mol:

1 mol ist jene Menge eines Stoffs, die aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12 Gramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind.
(One mole (abbr. mol) is the amount of substance that contains as many particles as there are in 12 gramms of carbon 12.)

Avogadrokonstante

$$N_A = \frac{N}{n} = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$$

N … Anzahl der Gasteilchen, *[N] = 1*
n … Stoffmenge, *[n] = mol*

Lehrsatz von Loschmidt

Ein Mol eines Gases enthält $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Gasteilchen, unabhängig von Druck und Temperatur.

Kurze Wiederholung aus **Band 2, Kapitel 4**:

- 1 mol ist jene Menge eines Stoffs, die aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12 Gramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind.
- 1 mol entspricht dem Molekulargewicht, ausgedrückt in Gramm.
- **atomare Masseneinheiten** *(unified atomic mass unit)* **u**.
  $1\ u = m_{C12}/12 = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg
- **Lehrsatz von Loschmidt**[1)]
  Ein Mol eines Gases enthält $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Gasteilchen, unabhängig von Druck und Temperatur. Dieser Wert wird **Avogadro-Konstante N_A** genannt.

In einem Quadrat lässt sich der Zusammenhang der besprochenen Größen darstellen:

Volumen V
Molvolumen V_m
$V = n \cdot V_m$
Stoffmenge n
Dichte
$m = \rho \cdot V$
Avogadrokonstante N_A
$N = n \cdot N_A$
Molmasse M
$m = n \cdot M$
Teilchenvolumen V_0
$V = V_0 \cdot N$
Masse m
Teilchenmasse m_0
$m = m_0 \cdot M$
Teilchenzahl N

Abb. 130.1

Wir können die obige Gleichung auch wie folgt schreiben: $\mathbf{p \cdot V = n \cdot R \cdot T}$
Eine weitere Form der Gasgleichung ist $\mathbf{p \cdot V = N \cdot k \cdot T}$.

Abb. 130.2 *JOSEPH LOSCHMIDT*

1) JOSEPH LOSCHMIDT, österreichischer Physiker, (1821, Putschirn bei Karlsbad – 1895, Wien). Studierte in Wien Philosophie, Mathematik und Physik und wurde zunächst Lehrer an einem Wiener Gymnasium ehe er die akademische Laufbahn einschlug. Neben der Abschätzung „Zur Größe der Luftmoleküle" (eine 1865 erschienene Arbeit) erarbeitete er auch eine neue chemische Formelsprache, die die Anordnung der Atome wiedergibt. Heute wird sie Strukturformel genannt. Selbst jetzt wird diese Tatsache oft nicht gewürdigt.

Beispiel 8.6

Welche Sauerstoffmenge (in kmol) befindet sich in der Sauerstoffflasche von **Beispiel 8.5**?

Wir formen die Gleichung $p \cdot V = R \cdot n \cdot T$ geeignet um und setzen die Werte von Beispiel 8.5 ein. Wir erhalten

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{8 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0{,}05 \text{ m}^3}{8{,}315 \text{ J/molK} \cdot 293 \text{ K}} = 164{,}18 \text{ mol}$$

Es sind **0,164 kmol Sauerstoff** in der Stahlflasche.

Beispiel 8.7

Wie groß ist die Masse m und die Teilchenzahl N von Luft in einem 5 m × 8 m × 3 m Physiksaal bei Zimmertemperatur und normalen Luftdruck?

Aus $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ berechnen wir

$$N = \frac{p \cdot V}{k \cdot T} = \frac{101\,352 \text{ Pa} \cdot 120 \text{ m}^3}{1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 293 \text{ K}} = 3 \cdot 10^{27}$$

Im Physiksaal sind etwa **$3 \cdot 10^{27}$ „Luftmoleküle“** enthalten.

Aus $p \cdot V = R_s \cdot m \cdot T$ berechnen wir

$$m = \frac{p \cdot V}{R_s \cdot T} = \frac{101\,352 \text{ Pa} \cdot 120 \text{ m}^3}{298 \text{ J/kgK} \cdot 293 \text{ K}} = 143{,}6 \text{ kg}$$

Die Masse der Luft beträgt fast **144 kg**.

Merk & Würdig

Zustandsgleichungen idealer Gase

$\mathbf{p \cdot V = R_s \cdot m \cdot T}$

$\mathbf{p \cdot V = n \cdot R \cdot T}$

$\mathbf{p \cdot V = N \cdot k \cdot T}$

p … Druck, *[p] = Pa*
V … Volumen, *[V] = m³*
m … Gasmasse, *[m] = kg*
n … Stoffmenge, *[n] = mol*
N … absolute Teilchenzahl, *[N] = 1*
R … allgemeine Gaskonstante R = 8,315 J/molK
T … Temperatur, *[T] = K*
R_s … spezifische Gaskonstante, $[R_s] = J/kgK$
k … Boltzmannkonstante

$$k = \frac{R}{N_A} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du anhand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Gasgesetze Ergebnisse errechnen.

Ü 8.14 Wie groß ist die Masse eines **a)** Wasserstoffatoms, **b)** eines Wassermoleküls, **c)** eines Sauerstoffmoleküls?

Ü 8.15 Berechne, wie viele „Moleküle“ sich in 1 m³ Luft (vgl. **Beispiel 8.7**) befinden.

Ü 8.16 Eine Druckflasche enthält komprimiertes Gas unter einem Druck von 35 bar und einer Temperatur von 20 °C. Auf welchen Wert fällt der Druck des Gases, wenn die Hälfte des Gases abgelassen wird und die Temperatur dabei auf 10 °C fällt?

Ü 8.17 Welche Dichte hat Wasserstoff, der in einer Druckflasche bei 15 °C und 100 bar eingeschlossen ist?

Ü 8.18 In einer 30 cm³ großen Glühlampe befindet sich Argon (R_s = 208 J/kgK). Der Druck im Inneren der Lampe beträgt 350 Pa und die Temperatur 20 °C.
Berechne, wie viel Gramm und wie viele Atome Argon in der Lampe sind?

Ü 8.19 Der Laguna-Nebel ist eine Wasserstoffwolke in etwa 3 900 Lichtjahren Entfernung. Das Gas wird durch Sterne im Nebel auf 7 500 K aufgeheizt. Man schätzt seine Dichte auf 80 Moleküle in 1 cm³. Wie groß ist der Druck in bar?

Ü 8.20 *If 3 m³ of a gas at STP[1] is placed under a pressure of 4 atm, the temperature of the gas rises to 40 °C. How great is the volume?*

[1] Normalbedingungen (STP von ***S****tandard* ***T****emperature and* ***P****ressure*)

8.4 Kinetische Gastheorie *(Kinetic theory of gases)*

Abb. 132.1 *Boltzmanns Büste in den Arkaden der Universität Wien*

LUDWIG BOLTZMANN[1] nahm die Existenz von Atomen als gegeben an und beschrieb das Verhalten eines Gases mit Hilfe von mechanischen Größen. Die **kinetische Gastheorie** ist der letzte Triumph des **mechanistischen Weltbildes** des 19. Jahrhunderts. Er nahm an, dass sich alle Vorgänge und Größen in der Natur durch mechanische Eigenschaften **deterministisch** (= vorherbestimmbar, eindeutig berechenbar) erklären lassen und definierte den Druck als auf eine Wandfläche übertragener Impuls pro Zeiteinheit:

$$\text{Druck} = \frac{\text{an die Wand abgegebener Impuls}}{\text{Zeit} \cdot \text{Wandfläche}}$$

Er erhielt zunächst die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m_0 \cdot \overline{v}^2$$

Der Ausdruck $m_0 \cdot \overline{v}^2$ entspricht bis auf den Faktor ½ einer kinetischen Energie. Kombiniert mit der Gleichungen $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ **(Kapitel 8.3)** erhält man die wichtige Formel

$$E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot kT$$

Diese Beziehung ist eine der wichtigsten Aussagen der kinetischen Gastheorie:

Die mittlere kinetische Energie der Moleküle eines (idealen) Gases ist zur absoluten Temperatur direkt proportional. Die Temperatur eines Gases ist ein Maß für die kinetische Energie seiner Moleküle.

Abb. 132.2 *Ein Molekül (Masse m_0) bewegt sich mit der Geschwindigkeit v_x auf die Wand zu.*

Die Summe aller mittleren Energien aller Gasteilchen wird **Innere Energie U** *(inertial energy)* genannt. Wird einem Gas Energie zugeführt, so steigt dessen Temperatur. Diese wird in kinetische Energie umgewandelt. Ein Gasmolekül hat nun folgende Möglichkeiten:

a) Translation **b)** Rotation **c)** Schwingung

Das sind die so genannten **Freiheitsgrade f**.

Im Normalfall erhält man für einatomige Gase mit f = 3 die zuvor beschriebene Gleichung der kinetischen Gastheorie $E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot kT$. Die mittlere Energie mit f Freiheitsgraden ergibt sich mit

$$E_{kin} = f \cdot \frac{1}{2} \cdot kT$$

Die mittlere Energie eines Moleküls beträgt für ein

einatomiges Gas (z. B. He)	zweiatomiges Gas (z. B. O_2)	mehratomiges Gas (z. B. CH_4)
f = 3	f = 5	f = 6
$E_{kin} = 3 \cdot ½\ kT = 3/2\ kT$	$E_{kin} = 5 \cdot ½\ kT = 5/2\ kT$	$E_{kin} = 6 \cdot ½\ kT = 3\ kT$
Abb. 132.3	**Abb. 132.4**	**Abb. 132.5**

Merk & Würdig

Grundgleichung der kinetischen Gastheorie[2]

$$\mathbf{p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m_0 \cdot \overline{v}^2}$$

p … Druck, *[p] = Pa*
N … absolute Teilchenzahl, *[N] = 1*
V … Gasvolumen, *[V] = m³*
m_0 … Teilchenmasse, *$[m_0]$ = kg*
$\overline{v}^2$ … Mittelwert des Geschwindigkeitsquadrats, *[v²] = m/s*

Merk & Würdig

Gleichverteilungssatz

Jedes Molekül besitzt im Mittel pro Freiheitsgrad die Energie $\frac{1}{2} \cdot kT$.

Merk & Würdig

Mittlere kinetische Energie eines Teilchens

$$\mathbf{E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot kT}$$

k … Boltzmannkostante
k = 1,38 · 10⁻²³ J/K
T … absolute Temperatur, *[T] = K*

[1] LUDWIG BOLTZMANN (1844, Wien – 1906, Wien), österreichischer Physiker. Bereits als 25-Jähriger erhielt er eine Professur in Graz, er wechselte anschließend nach Wien, wo er sich hauptsächlich mit thermodynamischen Prozessen beschäftigte. Dazu nahm er an, dass Gase aus individuellen Atomen bestehen. Für ihre Beschreibung benutzte er statistische Methoden. Wegen dieser Annahme wurde er von vielen seiner Kollegen angefeindet. Dass seine Ideen und die Existenz von Atomen im 20. Jahrhundert die Grundlagen der Physik bildeten, erlebte Boltzmann nicht mehr. Er schied 1906 freiwillig aus dem Leben, vermutlich, weil er die Anfeindungen nicht mehr ertragen konnte. Heutzutage wird er auch als „Vater der statistischen Mechanik" bezeichnet.

[2] Das Wort „**Gas**" stammt aus dem Griechischen *(„chaos")* und heißt übersetzt „Unordnung". Die regellose und zufällige Bewegung der Teilchen rechtfertigt diese Bezeichnung.

Beispiel 8.8

Wie groß ist die mittlere kinetische Energie E_{kin} von 1 mol eines idealen Gases bei 20 °C?

Wir setzen in die Gleichung $E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot kT$ ein und erhalten $E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K · 293 K = $6{,}06 \cdot 10^{-21}$ J.
Ein Teilchen besitzt eine Energie von $6 \cdot 10^{-21}$ J.
1 Mol besitzt daher eine Gesamtenergie von $6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 6 \cdot 10^{-21}$ J = **3 650 J**.
Ein Stein (m = 1 kg) mit 85 m/s besitzt die gleiche kinetische Energie.

Aus den beiden Gleichungen $E_{kin} = \frac{m_0 \cdot v^2}{2}$ und $E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot kT$ folgt nun die mittlere Geschwindigkeit eines Moleküls:
$\overline{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_0}}$:
Die absolute Temperatur eines Gases ist dem Quadrat der mittleren Geschwindigkeit der Gasmoleküle direkt proportional.

Merk & Würdig

Mittlere Geschwindigkeit eines Gasmoleküls
$\overline{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_0}}$

k … Boltzmannkonstante
T … absolute Temperatur, *[T] = K*
m_0 … Teilchenmasse, $[m_0] = kg$

Beispiel 8.9

a) Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit der Luftmoleküle O_2 in einem Physiksaal bei Zimmertemperatur?
b) Wie groß müsste seine Temperatur sein, um ins Weltall zu entweichen?
(Fluchtgeschwindigkeit v_f = 11 km/s)

a) Wir benützen die Gleichung für $\overline{v}$, wobei noch die Masse m_0 der Moleküle mit $M = m_0 \cdot N_A$ zu berechnen ist:
$m_0 = \frac{32 \text{ g/mol}}{6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 5{,}3 \cdot 10^{-23} \text{ g} = 5{,}3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
Wir erhalten daher für $\overline{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 293 \text{ K}}{5{,}3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}} =$ **478 m/s**

Die Sauerstoffmoleküle besitzen im Mittel eine Geschwindigkeit von mehr als 1 700 km/h.
Das ist größer als die Schallgeschwindigkeit in Luft.

b) Wir setzen die beiden Gleichungen für E_{kin} gleich:
$\frac{m_0 \cdot v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot kT \Rightarrow T = \frac{m_0 \cdot v^2}{3 \cdot k} = \frac{5{,}3 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot (11\,000 \text{ m/s})^2}{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}} = 154\,903 \text{ K}$
Das O_2-Molekül müsste eine Temperatur von 155 000 K besitzen.

Übungen

Mit diesen Übungen kannst du zeigen, ob du mit den Gleichungen der kinetischen Gastheorie umgehen kannst:

Ü 8.21 In einem abgeschlossenen Glas befindet sich eine Mischung aus Wasserstoff und Stickstoff. Auf Grund ihrer thermischen Geschwindigkeit fliegen die Moleküle hin und her. Welche Teilchen, Wasserstoff oder Stickstoff, haben die größere Geschwindigkeit? Oder fliegen beide im Mittel gleich schnell? Benutze für deine Überlegungen die Gleichungen dieses Kapitels.

Ü 8.22 Berechne die Größenordnung der inneren Energie von 1 m³ Helium He bei einer Temperatur von 20 °C.

Ü 8.23 Was gibt die Boltzmann-Konstante an?

Ü 8.24 Helium ist ein Gemisch aus den Isotopen ³He und ⁴He mit den molaren Massen 3 g/mol und 4 g/mol. Argumentiere: Welches Isotop bewegt sich im Mittel bei gleicher Temperatur schneller?

Mittlere Geschwindigkeit ausgewählter Gase in m/s

	200 K	273 K	300 K
He	1 113	1 301	1 365
O_2	393	459	482
N_2	421	491	515
H_2	1 574	1 840	1 928

Tab. 133.1

Übungen

Ü 8.25 Die Oberfläche der Sonne besitzt eine Temperatur von etwa 5 800 K und besteht hauptsächlich aus Wasserstoff (Masse eines Atoms $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg).

a) Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit?

b) Kann ein Wasserstoffatom der Sonne entkommen?

Fluchtgeschwindigkeit $\overline{v} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot G}{r}}$

G … Gravitationskonstante; $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ m^3/kgs^2$

m … Masse der Sonne; $m = 2 \cdot 10^{30}$ kg

r … Radius der Sonne; $r = 0{,}7 \cdot 10^6$ km

Ü 8.26 *What is the length of a side of a cube that contains the same number of molecules of a gas as the population on earth? Use a gas at STP. (Remember: $p_0 = 101\,325$ Pa, $T_0 = 273$ K)*
Which is the rms-speed of one of the molecules? Use hydrogen H.

Ü 8.27 Welche der folgenden Behauptungen ist richtig, welche falsch? Kreuze an:

	richtig	falsch
a) Die mittleren Bewegungsenergien sind alle zur absoluten Temperatur direkt proportional.	☐	☐
b) Die mittlere Geschwindigkeit eines Moleküls ist nur von der Temperatur abhängig.	☐	☐
c) Die Gasmoleküle stoßen mit größerer Geschwindigkeit an die Wand; dadurch erhöht sich die Temperatur des Gases.	☐	☐
d) Die Boltzmann-Konstante hängt von der Art des Gases ab.	☐	☐
e) Bei gleicher Temperatur haben die Gasmoleküle eines „leichten" Gases eine kleinere mittlere Geschwindigkeit als ein „schweres" Gas.	☐	☐

Ü 8.28 Man bringt 40 kg eines Gases in ein Volumen V. Anschließend wird dieses Gas in einen würfelförmigen Behälter mit doppelter Seitenlänge gebracht. Bestimme die folgenden Proportionen!

Seitenlänge	$a_1 : a_2 = 1 : 2$
Oberfläche	$O_1 : O_2 = 1 :$
Volumen	$V_1 : V_2 = 1 :$
Teilchenzahl	$N_1 : N_2 = 1 :$
Druck	$p_1 : p_2 = 1 :$
mittlere Geschwindigkeit	$v_1 : v_2 = 1 :$
Temperatur	$T_1 : T_2 = 1 :$
Masse	$m_1 : m_2 = 1:$

Ü 8.29 Abb. 135.1 zeigt für Stickstoff die Geschwindigkeitsverteilung an.

a) Interpretiere die 300 K-Kurve.

b) Welche der folgenden Aussagen ist richtig, welche falsch? Kreuze an!

	richtig	falsch
1) Man kann die Anzahl der Stöße der einzelnen Moleküle untereinander ablesen.	☐	☐
2) Bei hohen Temperaturen gibt es nur schnelle Teilchen.	☐	☐
3) Es gibt eine Geschwindigkeit, mit der sich relativ viele Moleküle bewegen.	☐	☐
4) Bei jeder Temperatur gibt es eine maximale Geschwindigkeit.	☐	☐
5) Je niedriger die Temperatur, desto schmäler und höher ist die Form der Kurve.	☐	☐
6) Auch bei hohen Temperaturen gibt es Teilchen, die sich langsamer als die mittlere Geschwindigkeit bewegen.	☐	☐

Übungen

c) Um welche Kurven handelt es sich in **Abb. 135.1**?

- ☐ Isobare
- ☐ Isotherme
- ☐ Isochore
- ☐ weder noch.

d) Wie ändert sich die Kurve, wenn die Temperatur verdoppelt wird?

e) Welche Bedeutung hat die Fläche unter einer der Kurven? Kreuze an.

- ☐ Das kann man nicht sagen. Es kommt auf die Art des Gases an.
- ☐ Keine. Es wird zufällig eine Fläche eingeschlossen.
- ☐ Sie gibt an, wie groß der Anteil von Molekülen ist, die sich in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich befinden. Die Gesamtfläche ist daher 1, da sich alle Teilchen „irgendwie" bewegen.
- ☐ Da es immer andere Volumina gibt, ist auch die Fläche immer verschieden groß.
- ☐ Es kommt auf die Anzahl der Teilchen an. Eigentlich ist die Fläche unendlich groß.
- ☐ Die Fläche ist unendlich groß, da es auch Teilchen gibt, die eine sehr hohe Geschwindigkeit haben, und daher die Kurve sich asymptotische der x-Achse nähert.

f) Man will wissen, wie viele Teilchen eine Geschwindigkeit zwischen 500 m/s und 1 000 m/s besitzen. Wie lautet der (mathematische) Ansatz? Wie sieht die grafische Darstellung aus?

g) In **Abb. 135.1** ist die Geschwindigkeit eines Gasvolumens nur bis 2 000 m/s eingezeichnet. Wie sieht es bei 3 000 m/s? Überlege!

- ☐ Welches Molekül ist schon so schnell?
- ☐ Die Kurve schneidet die x-Achse.
- ☐ Die Kurve nähert sich der x-Achse asymptotisch.
- ☐ Die Anzahl der Moleküle mit dieser Geschwindigkeit ist null.
- ☐ Die Anzahl der Moleküle mit dieser Geschwindigkeit ist verschwindend klein, aber ungleich null.
- ☐ Die Anzahl der Moleküle mit dieser Geschwindigkeit ist beliebig groß.

Abb. 135.1

9 Wärme und Arbeit

In diesem Kapitel geht es um

- irreversible Prozesse
- Entropie
- adiabatische Zustandsänderung
- Kreisprozesse
- den thermodynamischen Wirkungsgrad
- Wärmepumpen und Kältemaschinen

9.1 Hauptsätze der Wärmelehre *(the laws of thermodynamics)*

Mit Volldampf unterwegs auf der Straße des technischen Fortschritts

- stampfte am Beginn die **Dampfmaschine**, die 1769 für James Watt patentiert wurde. Sie hat die Arbeitswelt vollkommen verändert.
- zischte die Dampflokomotive, nachdem Georg Stephenson 1814 die erste gebaut hatte. Sie veränderte das Verkehrswesen grundlegend.
- beschleunigte man immer schwungvoller mit der Konstruktion von **Verbrennungsmotoren** und mit dem Bau von **Flugzeugturbinen**.
- brummen Klimaanlagen. Sie sind aus der zeitgemäßen Glasfassadenarchitektur und aus unserem Computerzeitalter nicht wegzudenken.

Die Fundamente des technischen Fortschritts sind die Gesetze der Thermodynamik.

Abb. 137.1 *Dampfmaschine*

9.1.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Energie lässt sich nicht wegzaubern – nur umwandeln!

So kann man den Ersten Hauptsatz der Wärmelehre verkürzt formulieren.

Der 1. Hauptsatz ist eine Erweiterung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik unter Einbeziehung der Wärme.

Betrachten wir zwei Möglichkeiten, die Temperatur eines Gases zu erhöhen:

T steigt
p steigt
V = konstant
T steigt
Druck p
Isolation

Abb. 137.2 *Durch Zufuhr von Wärme (links) oder Kompressionsarbeit (rechts) kann die Temperatur eines Gases erhöht werden.*

„Reiben wir z. B. zwei Metallplatten aneinander, so werden wir Bewegung verschwinden, Wärme dagegen auftreten sehen und es fragt sich jetzt nur, ist die Bewegung die Ursache von Wärme."
JULIUS MAYER

Im Jahr 1842 veröffentlichte Julius Mayer seine Untersuchungen zum Thema Temperaturerhöhung in einer Flüssigkeit beim Verrichten von mechanischer Arbeit. Er formulierte darin den 1. Hauptsatz der Wärmelehre.

Man kann die Temperatur eines Stoffes durch Zufuhr von Wärme oder von mechanischer Arbeit erhöhen.

Diese Version des Ersten Hauptsatzes der Wärmelehre stimmt nur für Vorgänge ohne Phasenübergänge.

Innere Energie *(internal energy)*

Erhitzt man beispielsweise Wasser, beginnt es zu sieden. Die Temperatur erhöht sich dabei nicht, obwohl Wärmeenergie zugeführt wird.

Um auch solche Fälle zu beschreiben, benötigt man eine weitere Größe, die **Innere Energie U** eines Stoffes. Die Innere Energie ist die Summe der in einem Stoff gesammelten Energien, also die ungeordnete Bewegungsenergie (Wärme) und die latente Wärme (Bindungsenergien zwischen den Teilchen).

Die exaktere Version des Ersten Hauptsatzes der Wärmelehre lautet somit:

$Q_1 > 0$
$W_1 > 0$
$W_2 < 0$
System
$Q_2 < 0$

Abb. 137.3 ***Energiebilanz:*** *Für den 1. Hauptsatz gilt: Q und W sind bei Zufuhr in das System positiv zu werten; bei Abfuhr negativ.*

Merk & Würdig

Die Innere Energie ***U*** eines Systems kann sich durch Energiezufuhr oder Energieabgabe in Form von Arbeit ***W*** und von Wärme ***Q*** ändern:

$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$

9.1.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Möglich, aber unwahrscheinlich *(possible, but unlikely)*

Irreversible Prozesse laufen von selbst nur in eine Richtung. Betrachten wir folgende Beispiele irreversibler Prozesse:

- Wärme strömt von „warm" zu „kalt".
- Gase vermischen sich (Diffusion).
- Das Zerspringen eines Trinkglases, das auf den Boden fällt.
- Auch komplexe Systeme des Lebens sind irreversibel! Der Jungbrunnen wurde noch nicht erfunden **(Abb 138.1)**.

All diese Vorgänge sind vom Energieerhaltungssatz in beide Zeitrichtungen erlaubt, aber sie laufen nur in einer Vorzugsrichtung ab. Sie widersprechen dabei nicht dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre.

Ein verkehrt abgespielter Film eines irreversiblen Vorgangs wirkt unglaubwürdig! Man stelle sich vor, dass eine zersprungene Tasse vom Fußboden aufspringt und heil wieder in der Hand landet! Bei **reversiblen** Prozessen hingegen – z. B. dem Schwingen eines „reibungsfreien" Pendels – kann man den umgekehrt abgespielten Film vom richtig abgespielten Film nicht unterscheiden **(Abb 138.2)**.

Abb. 138.1 ***Verjüngungsmühle:*** *Kupferstich aus dem 17. Jhdt. Vom Standpunkt der Mechanik wäre gegen eine derartige Umkehrung des Ablaufs der Zeit nichts Triftiges einzuwenden …*

Abb. 138.2 *Eadweard Muybridge (1830 – 1904) „Head-spring, a Flying Pigeon Interfering"*

Merk & Würdig

Umkehrbar = Reversibel

Unumkehrbar = Irreversibel

Genau genommen sind Prozesse, wie sie in der Realität stattfinden immer **unumkehrbar**! Reversible Vorgänge sind eine Idealisierung, denen nur theoretische Bedeutung zukommt. (In der Mechanik entspricht einer solchen Idealisierung der Begriff „reibungsfrei").

Experiment

Gedankenexperiment „weniger ist mehr"

Gasteilchen in einem Zylinder bewegen sich ungeordnet. Wir begnügen uns mit Gas, das nur ganz wenige Teilchen enthält.

Abb. 138.3 *Gas mit zwei bzw. drei Teilchen in einer Box*

Teilchen-anzahl	Wahrscheinlichkeit P	P in %
1	$\frac{1}{2}$	50
2	$\frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}$	25
3	$\frac{1}{2^3} = \frac{1}{8}$	12,5
N	$\frac{1}{2^N}$	

Tabelle 138.1 *Angenommen, man interessiert sich dafür, dass sich alle Teilchen genau in der linken Hälfte einer Box versammeln. Die Wahrscheinlichkeit P für dieses Ereignis zeigt diese Tabelle.*

Wie man erkennt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich viele Teilchen in einer Hälfte versammeln, gering. Hingegen ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Teilchen relativ gleichmäßig auf zwei Hälften verteilen, deutlich größer!

Beispiel 9.1

Der „Laplace´sche Dämon[1]“ macht Ordnung …

In einem gasgefüllten Zylinder seien zu Beginn auf jeder Seite 25 Teilchen „**unordentlich**“ verteilt.

Der Laplace'sche Dämon macht auf seine Art Ordnung. Er wartet einfach darauf, bis alle Teilchen ganz von allein auf eine Seite gewandert sind.

Annahme: Jeweils ein Teilchen wechselt pro Sekunde den Mikrozustand. Wie lang muss der Dämon warten, bis sich alle 50 Teilchen auf der linken Seite befinden, wenn pro Sekunde ein Teilchen die Hälfte wechselt?

Abb. 139.1 *„Dämon beim Studium“*

Für 50 Teilchen ist die Anzahl aller möglichen Zustände: $\Omega = 2^{50}$.

Wenn ein Teilchen pro Sekunde den Mikrozustand wechselt, kommt es ca. alle 2^{50} s vor, dass alle Teilchen in einer Hälfte versammelt sind. Das entspricht etwa 10^{15} s (ca. 36 Millionen Jahre).

Bei einem Weltalter von ~10^{10} Jahren würde der Zustand, dass alle 50 Teilchen wieder in einer Hälfte versammelt sind, wohl ein paarmal eintreten. In diesem Beispiel wurden nur 50 Teilchen vorgesehen. In **Realen Gasen** hat man es aber mit weitaus größeren Teilchenzahlen (1 Mol ~ 10^{24} Teilchen) zu tun, dort müsste der „Dämon" also undenkbar lang ($2^{10^{24}}$ s) warten!

Bei realen Bedingungen mit Teilchenzahlen, wie sie makroskopischen Systemen entsprechen, kann man behaupten: Es ist unmöglich, dass sich Gas von selbst in einer Hälfte sammelt!

Abb. 139.2

Entropie *(entropy)*

Wir können nun die **zeitliche Unsymmetrie** von irreversiblen Vorgängen besser verstehen: Es ist unwahrscheinlich, dass sich ein System zu einer ungleichmäßigen Verteilung „entschließt". Umgekehrt betrachtet ist eine gleichmäßige Verteilung der Teilchen im Kolben **wahrscheinlicher**. Das Gas nimmt von sich aus „lieber" den **unordentlichen** Zustand ein. Es verteilt sich so, dass möglichst bald etwa gleich viele Teilchen in beiden Hälften der Box sind.

Das Maß für den Grad der Unordnung wird Entropie genannt.

- Gas breitet sich von selbst im Raum aus, weil es so den Zustand mit der größeren Wahrscheinlichkeit, also mit **höherer Entropie** einnimmt.
- Der Temperaturausgleich zwischen zwei Körpern entspricht dem Übergang von einem Zustand geringerer Wahrscheinlichkeit zu einem Zustand mit höherer Wahrscheinlichkeit.
  Oder kürzer formuliert: Wärme strömt von „warm" zu „kalt". Die **Entropie steigt** dabei.

Wir können nun zusammenfassend den **Zweiten Hauptsatz** der Thermodynamik formulieren:

Abb. 139.3 *PIERRE SIMON DE LAPLACE*

Merk & Würdig

Jedes abgeschlossene System hat das Bestreben, in einen Zustand größerer Wahrscheinlichkeit, also mit größter Unordnung bzw. **Entropie** überzugehen.

SCHOPENHAUERS „ENTROPIE-GESETZ":
„Wenn man einen Teelöffel Wein in ein Fass Jauche gibt, ist das Resultat Jauche. Wenn man einen Teelöffel Jauche in ein Fass Wein gibt, ist das Resultat ebenfalls Jauche."

„In der Natur nimmt die Entropie die Rolle des Direktors ein, die Energie aber nur die eines Buchhalters."
ARNOLD SOMMERFELD

[1] Auf PIERRE SIMON DE LAPLACE (1749 Normandie – 1827 Paris), den Urahn der Wahrscheinlichkeitstheorie, geht die Vorstellung des „Laplace´schen Dämons" zurück: ein fiktives Wesen, das zu einem bestimmten Zeitpunkt exakt alle Mikrozustände kennt. Demzufolge ist die Welt in alle Ewigkeit determiniert. Determiniert bedeutet, dass alle Ereignisse bis zur fernsten Zukunft berechenbar sind. – Einzige Voraussetzung: Man muss einmal alles ganz genau wissen … ☺

Entropie und Phasenübergänge

Bei Erhöhung der Temperatur des Festkörpers beginnen die Atome, um ihre Gleichgewichtslagen zu schwingen. Unsere Information über ihre momentane Position nimmt ab. Die Entropie nimmt dabei zu. Bei der Schmelztemperatur schmilzt der Kristall. Die geordnete Gitterstruktur bricht weitgehend zusammen. Die Entropie steigt **sprunghaft** an. Analoges gilt für die weiteren Phasenübergänge **(Abb. 140.1)**.

Entropie in der Chemie

Aus der Beobachtung im Alltag könnte man meinen, dass chemische Prozesse immer so ablaufen, dass dabei Wärme freigesetzt wird (**exotherme Prozesse** wie die Verbrennung). Allerdings gibt es auch chemische Reaktionen, zu deren Ablauf Wärmeenergie zugeführt werden muss. Diese kühlen gleichsam die Umgebung ab (**endotherme Prozesse**, beispielsweise erniedrigen Salz-Eisgemische die Umgebungstemperatur). Auch bei endothermen Vorgängen nimmt die Entropie zu. In der Chemie laufen Prozesse (von selbst) in Richtung wachsender Entropie ab!

Entropie und Information

Der Begriff Entropie ist in der Kommunikations- und Informationstheorie ein zentraler Bestandteil[1]: Der Empfänger einer Nachricht weiß in der Regel über den Zustand eines Systems weniger als der Sender einer Nachricht. Dieser unterschiedliche Kenntnisstand wird Entropie genannt. Man kann die Entropie verringern, indem der Sender dem Empfänger Information zukommen lässt. Dieser Prozess läuft aber nicht von selbst ab, sondern meist unter Zufuhr von elektrischer Energie. Die Entropie sinkt und die Information steigt. Andererseits gehen Daten im Lauf der Zeit „verloren", dabei steigt die Entropie des Systems! **Entropie ist ein Maß des Nichtwissens.**

Entropie und Energieverbrauch

Wenn wir Energie „verbrauchen", wandeln wir eine Energie in eine andere Energie um. Dabei wird zwangsläufig immer auch ungeordnete Wärmeenergie entstehen. Energie verbrauchen heißt also letztendlich, dass wir bei der Energieumwandlung **Energie** entwerten. Zurück bleibt ungeordnete Bewegungsenergie, die nicht mehr nutzbar ist mit maximaler Entropie.

Entropie und Zeit

In der gesamten Newton'schen Mechanik existiert **kein** Naturgesetz oder Axiom, das eine Zeit**richtung** kennt. Wenn man bedenkt, wie fundamental es für uns ist, dass die Zeit immer nur in eine Richtung fließt, ist das schon sehr erstaunlich!

Anders ist dies in der Thermodynamik: Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ist es unmöglich, Milch aus einem Kaffee wieder „herauszurühren". Irreversible Vorgänge sind geeignet, einen **Zeitpfeil** festzulegen. Interessanterweise – und das sollte zu denken geben – ist diese Richtung der Zeit aber nur im Makrokosmos für höhere Teilchenzahlen verbindlich. Für wenige Teilchen kann die Zeit auch rückwärts laufen …

Im gesamten Universum läuft die Zeit nur in eine Richtung, in Richtung steigender Entropie.

Ein Temperaturausgleich im Wasser ist viel wahrscheinlicher als …
0 °C
70 °C
100 °C
… die selbständigt Trennung in Eis und siedendes Wasser.

Entropie
fest
flüssig
gasförmig
Temperatur

Abb. 140.1 ***Entropie und Phasenübergänge:*** *Erhitzt man einen Festkörper, erhöht sich seine Entropie. Beim Schmelzen und Verdampfen erhöht sich die Entropie sprunghaft!*

Abb. 140.2 *Das Bildsignal wird Pixel für Pixel übertragen, der* ***Zunahme an Information*** *beim Empfänger entspricht ein* ***Verlust an Entropie****. Geht umgekehrt ein Bildsignal (von selbst) immer mehr durch thermisches Rauschen „verloren", entspricht das einer* ***Zunahme von Entropie****.*

BEI DEINER NEUEN UHR WEISS ICH NIE, OB SICH DIE ZEIGER VOR ODER ZURÜCK DREHEN!
ENTROPIE-UHR

Abb. 140.3 ***„Entropische Zeit":*** *Die Richtung der Zeit wird durch den Entropiefluss vorgegeben. Theoretisch kann die Zeit bei Systemen mit nur wenigen Mikroteilchen auch rückwärts laufen …*

[1] Der Entropiebegriff der **Informationstheorie** (von SHANNON) ist etwas anders als in der Wärmelehre definiert!

Ergänzung & Ausblick

Entropie und Leben

- Wenn die Entropie (und damit die „Unordnung") immer mehr steigt, warum gibt es dann so **komplexe Strukturen wie biologische Lebenssysteme**?
- Lebewesen sind aufgebaut aus einer Vielzahl biologischer Zellen. Diese sind aufgebaut aus hoch **geordneten** Molekülen. Kann da der Zufall Baumeister sein?
- Vorgänge in der Natur, also in **„selbstordnenden Systemen"**, verlaufen doch offenbar gegen das Prinzip steigender Entropie. Widerspricht das nicht dem 2. Hauptsatz der Wärmelehre?

Leben „lebt", weil Lebewesen

- offene Systeme sind, die ständig Energie (Nahrung, Sonnenlicht) aufnehmen, um den Zustand der geringen Entropie aufrecht zu erhalten.
- überschüssige Entropie an die Umwelt abgeben: Tiere nehmen entropiearme Nährstoffe wie Glucose auf und stellen daraus entropiereiche Produkte wie Kohlendioxid und Wasserdampf her.
- **entropiearme Systeme hoher Ordnung** sind. Dieser unwahrscheinliche Zustand kann nur durch permanente Zufuhr von Energie (**Sonnenenergie**) sowie durch Abgabe von Entropie aufrechterhalten werden.

Der Trugschluss, dem man hier aufsitzen kann, liegt darin, dass man vergisst zu überprüfen, ob die Natur tatsächlich ein abgeschlossenes System ist. Nur für wirklich abgeschlossene Systeme (z. B. das Universum!) strebt die Entropie gegen ein Maximum.

Abb. 141.1

JOE: Albert Einstein hat das Entropiegesetz als das "wichtigste Gesetz " bezeichnet. Das Gesetz besagt, dass das gesamte Universum auf einen ungeordneten, kalten Zustand hinläuft ...

LEO: Alles strebt zum Chaos? Warum hält sich dann die Natur mit ihren abermilliarden geordneten Molekülen nicht daran?

LISA: Das ist doch der beste Beweis für das Eingreifen einer höheren Intelligenz. Die muss das Leben erschaffen haben ...

JOE: Eigentlich wächst unsere Natur durch die Sonne ...

LISA: Die Ägypter haben sogar an einen Sonnengott geglaubt!

LEO: ein Universum, dass sich ständig ausdehnt und auskühlt? Keine schöne Vorstellung!
- Und das soll ein guter Gott geschaffen haben?

LISA: Der Glaube kann uns die Angst vor einer ungewissen Zukunft nehmen! Der Entropiesatz hat nicht das letzte Wort!

LEO: Also das Chaos auf meinem Schreibtisch ist der beste Beweis für das Entropiegesetz!

Abb. 141.2

Merk & Würdig

- **1. Hauptsatz der Wärmelehre:**
  Die Temperatur eines Stoffes erhöht sich durch Zufuhr von Wärme oder von mechanischer Arbeit. Durch Energiezufuhr oder Energieabgabe in Form von Arbeit W und von Wärme Q verändert sich die Innere Energie U eines Systems: $\Delta U = \Delta W + \Delta Q$
- **Entropie** ist ein Maß für die möglichen Mikrozustände eines Systems. Entropie ist der Grad der Unordnung im Sinn von Chaos oder Zufälligkeit.
- **2. Hauptsatz der Wärmelehre:**
  Jedes abgeschlossene System hat das Bestreben in einen Zustand größerer Wahrscheinlichkeit, also mit größter Unordnung bzw. Entropie, überzugehen.

„Der allgemeine Lebenskampf der Lebewesen ist nicht ein Kampf um die Grundstoffe, … auch nicht um Energie, welche … in jedem Körper reichlich vorhanden ist, sondern ein Kampf um die Entropie"
LUDWIG BOLTZMANN

Übungen

Wenn du die folgenden Aufgaben löst, dann kannst du zum Thema Hauptsätze der Wärmelehre naturwissenschaftliche Vorstellungen nach ihrer sachlichen Richtigkeit hinterfragen!

Ü 9.1 **a)** Energie kann

- ☐ gewonnen werden.
- ☐ verloren gehen.
- ☐ von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden.

b) Der 1. Hauptsatz ist

- ☐ eine Erweiterung des Energieerhaltungssatzes.
- ☐ ein Sonderfall des Energieerhaltungssatzes.

c) In einem abgeschlossenen System wird die Entropie im Lauf der Zeit

- ☐ kleiner.
- ☐ größer.
- ☐ konstant bleiben.

d) Die Kernaussage des 1. Hauptsatzes bedeutet:

- ☐ Energie bleibt erhalten.
- ☐ Energie wird kleiner.
- ☐ Energie wird größer.

Abb. 142.1 *Erste Hauptsätze*

Ü 9.2 In einem Zylinder befindet sich Gas, das idealisiert nur durch 4 Teilchen dargestellt wird.

a) Gib die Wahrscheinlichkeit an, dass sich alle Partikel in einer Hälfte befinden.

b) Begründe folgende Behauptung mit Hilfe von Skizzen oder/und Rechnung(en):
„Das Gas strebt von sich aus eine relativ gleichmäßige Aufteilung in die Hälften des Zylinders an."

9.2 Ein Gas verrichtet Arbeit *(work done by a gas)*

Abb. 142.2 *Die Arbeit W entspricht der Fläche unter dem Graphen.*

Wärmekraftmaschinen wandeln Wärme eines expandieren Gases in Arbeit um.

Beispiele dafür sind:

- **Verbrennungsmotoren** und Strahltriebwerke von Flugzeugen:
  Wärme wird durch **Innere Verbrennung** zugeführt.
- die Dampfmaschine, der Warmluftmotor (Stirlingmotor) und die Dampfturbine:
  Externe Wärme wird in mechanische Energie umgewandelt.

Arbeit im *p*-*V*-Diagramm

***p*-*V*-Diagramme** werden auch Arbeitsdiagramme genannt, da die Fläche unter dem Diagramm als Arbeit interpretiert werden kann. Die Arbeit W, die verrichtet wird, lässt sich unter dem Graphen erkennen. Im Sonderfall der isobaren Zustandsänderung ist die Fläche unter dem Diagramm ein Rechteck **(Abb. 142.2)**.

Beispiel 9.2

Isobare Zustandsänderung: Gegen einen **gleich** bleibenden Druck von 35 bar expandiert der Kolben (Δx = 57 mm). Kolbendurchmesser d = 155 mm.

a) Welche Arbeit verrichtet der Kolben?

b) Welche Wärmemenge muss zugeführt werden?

a) Bei dem Vorgang verrichtet das Gas Expansionsarbeit: Der Kolben (Querschnittsfläche A) wird gegen eine Kraft **F = p · A** um ein Stück Δx verschoben. Die Arbeit W ergibt sich mit $W = F \cdot \Delta x = p \cdot A \cdot \Delta x = p \cdot \Delta x$

(A · Δx entspricht der Volumsvergrößerung ΔV). Diese Arbeit ist im p-V-Diagramm **(Abb. 142.2)** als rechteckige Fläche unter dem Graphen erkennbar!

Unter Beachtung der Vorzeichenregelung aus **Abb. 137.3** erhält man:

$$W = -p\Delta V = -p\frac{d^2}{4}\pi \cdot \Delta x = -35 \cdot 10^5\,Pa \cdot \frac{(0{,}155m)^2}{4}\pi \cdot 0{,}057m = \mathbf{-3{,}8\,kJ}$$

Der Kolben **verrichtet** bei der Expansion etwa **3,8 kJ Arbeit**.

b) Die zugeführte Wärmemenge *Q* erhöht im Allgemeinen auch die Temperatur *T*. Damit verändert sich die Innere Energie um *ΔU*. Aus dem Ersten Hauptsatz ergibt sich:

$$Q = \Delta U - W = \Delta U - (-3{,}8kJ)$$

Zusätzlich zu der Energie von 3,8 kJ muss also noch Innere Energie U **zugeführt** werden.

Abb. 143.1 ***Expansion bei konstantem Druck (isobar):*** *Die Innere Energie steigt – der Kolben verrichtet Arbeit.*

Das Arbeitsintegral

Im Allgemeinen ist der Druck nicht konstant und die Fläche unter dem Graphen im p-V-Diagramm kein Rechteck **(Abb.143.2)**. Die Integralrechnung ermöglicht trotzdem die Berechnung der Arbeit W:

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p(V)d(V)$$

W … Verrichtete mechanische Arbeit
V_1 und V_2 … Integrationsgrenzen
p(V) … Funktion des Drucks abhängig vom Volumen V

Bei der **Kompression** ist V_1 größer als V_2. Die sich ergebende Arbeit ist daher positiv – sie muss also von außen zugeführt werden. Umgekehrt gilt, dass bei der **Expansion** V_1 kleiner als V_2 ist. Die sich ergebende Arbeit ist somit negativ – die Arbeit wird also frei.

Abb. 143.2 *Die Arbeit W entspricht der Fläche unter dem Graphen im p-V-Diagramm. (Minus-Zeichen wegen der Vorzeichenkonvention!).*

Arbeit bei einer isothermen Zustandsänderung

Das Prinzip einer isothermen Kompression zeigt **Abb. 143.3**. Im **Kapitel 8.2.3** wird das dazugehörige Gasgesetz $p_1V_1 = p_2V_2$ vorgestellt. Für Anfangsbedingungen p_1 und V_1 schreibt sich dieses:

$$p(V) = \frac{p_1V_1}{V}$$

Weiters gilt, dass die Temperaturänderung null ist (isotherm). Daher ist die Änderung der Inneren Energie *ΔU = 0*. Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre reduziert sich somit auf: *ΔQ = –ΔW*. Bei der **isothermen Expansion** wird die zugeführte Wärme vollständig in äußere Arbeit umgesetzt! Damit ergibt sich für das Integral:

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p(V)dV = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1V_1}{V}dV = -p_1V_1\ln V\Big|_{V_1}^{V_2} = -p_1V_1(\ln V_2 - \ln V_1) = -p_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1} = \mathbf{p_1V_1\ln\frac{V_1}{V_2}}$$

Nach Einsetzen der allgemeinen Gasgleichung *pV = nRT* erhält man für die Kompression:

$$\mathbf{W = nRT\ln\frac{V_1}{V_2}}$$

Eine analoge Rechnung mit dem Druck als Integrationsvariable ergibt: $\mathbf{W = nRT\ln\frac{p_1}{p_2}}$

Abb. 143.3 ***Kompression bei konstanter Temperatur:*** *Um eine isotherme Zustandsänderung zu erreichen, muss ein optimaler Wärmeaustausch mit der Umgebung (Wärmereservoire) möglich sein.*

Beispiel 9.3

Airbrush

Kompressoren werden in Werkstätten verwendet, um Druckluftwerkzeuge (z. B. Spritzpistolen für Lackierarbeiten) zu versorgen. Laut Herstellerangaben verdichtet ein Kompressor für Airbrush-Anwendung pro Minute 14 Liter Luft auf 32 psi (2,2 bar) bei Umgebungstemperatur (25 °C). Die Kompression erfolgt dabei annähernd **isotherm**.
Gesucht ist die dafür nötige Leistung des Geräts.

1. Über das allgemeine Gasgesetz wird die Stoffmenge n berechnet.
Beachte: Der Druck muss vermehrt um den äußeren Luftdruck (~1 bar) eingesetzt werden:

$$pV = nRT \Rightarrow n = \frac{pV}{RT} = \frac{3{,}2 \cdot 10^5\, Pa \cdot 0{,}014\, m^3}{8{,}3 J/(K \cdot mol) \cdot 298\, K} = \mathbf{1{,}8\, mol}$$

2. Berechnung des Ausgangsvolumens (Boyle-Mariotte'sche Gesetz):

$$V_1 = \frac{p_2 V_2}{p_1} = \frac{3{,}2\, bar \cdot 0{,}014\, m^3}{1\, bar} = \mathbf{0{,}045\, m^3}$$

3. Die zugeführte Kompressionsarbeit ergibt: $W = nRT \cdot ln \frac{V_1}{V_2} = \mathbf{5{,}2\, kJ}$

4. Berechnung der Leistung: $P = \frac{W}{t} = \frac{5{,}2\, kJ}{60\, s} = \mathbf{86{,}3\, W}$

Abb. 144.1

Beispiel 9.4

Zahnarztbohrer – Isotherme Expansion in einer Luftturbine

Die neueste Generation der Turbinen, wie sie in Zahnarztpraxen zur Anwendung kommen, hat Keramikkugellager, mit denen eine Drehzahl bis zu 400 000 rpm erreicht werden kann. Keramikkugellager haben den Vorteil, dass sie einen vibrationsarmen Lauf und einen geringeren Verschleiß haben, außerdem sind sie wesentlich leiser. Der Bohrer weist eine Leistung von 20 W auf. Bei dieser annähernd isothermen Expansion wird Luft von 2,7 bar auf 1 bar entspannt.

Welchen Luftdurchsatz pro Minute hat solch eine Turbine?

1. Berechnung der Arbeit: $W = P \cdot t = -20\, W \cdot 60\, s = \mathbf{-1{,}2\, kJ}$

2. Aus $W = nRTln \frac{p_1}{p_2}$ erhält man die Luftmenge, wenn das allgemeine Gasgesetz $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ mitbeachtet wird:

$$V_1 = \frac{W}{P_1 \cdot ln \frac{p_1}{p_2}} = \frac{-1{,}2\, kJ}{4 \cdot 10^5\, Pa \cdot ln \frac{1}{4}} = \mathbf{2{,}2\, dm^3}$$

Hinweis: Das Vorzeichen für die Arbeit muss negativ gewählt werden. Es handelt sich um eine Expansion, bei der Arbeit frei wird.

Abb. 144.2 ***Zahnarztbohrer mit Luftturbine:*** *Eine Zahnarztturbine wandelt die in der Druckluft gespeicherte Energie in mechanische Energie durch Expansion zwischen den Schaufelrädern um.*

Übungen

Wenn du die folgenden Aufgaben löst, dann kannst du zum Thema Wärme und Arbeit Zusammenhänge herstellen und für isobare bzw. isotherme Zustandsänderungen Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 9.3 **Aufwindkraftwerk:** (Trockene) Luftmasse wird durch die Sonne (Abb. 144.2) aufgeheizt. Der Druck bleibt bei *p = 1013 mbar* konstant (isobare ZÄ). Das Luftvolumen dehnt sich dabei aus.

a) Berechne die Volumsänderung, wenn das Ausgangsvolumen (100 m^3) von 10 °C auf 30 °C aufgeheizt wird.

b) Welche Arbeit wird dabei (in Form von Aufwind) frei?

Abb. 144.3 ***Aufwindkraftwerk:*** *Kühle Luft wird unter Glasdächern erwärmt und dehnt sich aus. Die Energie des entstehenden Aufwinds wird in einer Turbine im „Windturm" in elektrische Energie umgewandelt.*

Übungen

Ü 9.4 Das „wichtigste Stück" von leistungsstarken Verbrennungsmotoren ist der **Turbolader**. Seine Aufgabe besteht darin, Luft zu verdichten. Wird mehr Luft in den Brennraum gepresst, kann auch entsprechend mehr Kraftstoff eingespritzt werden. Dabei lässt sich die Leistung des Motors bei gleichem Hubraum steigern. Ein „Turbo" mit Ladeluftkühlung verdichtet Luft beispielsweise von 1 bar auf 1,5 bar (annähernd isotherm).

a) Welches Volumen wird pro Stunde angesaugt, wenn die Anlage mit 550 m^3 verdichteter Luft pro Stunde die Zylinder speist?

b) Welche Stoffmenge in mol wird bei 20 °C auf 1,5 bar komprimiert?

c) Welche Energie ist dazu pro Stunde notwendig? Welche Leistung benötigt der Kompressor?

Ü 9. 5 **Erdgasentspannungsanlage** (Abb. 145.1): Erdgas wird von 45 bar auf 5 bar (absolut) entspannt. Dabei wird eine Leistung von 2 300 kW zur Stromerzeugung frei. Berechne: Wie viel m^3 Erdgas müssen dabei pro Stunde expandiert werden? (Voraussetzung: isotherme Expansion).

Bemerkung: Die bei einer isothermen Expansion notwendige Wärme kommt durch Wärmeaustausch mit der Umgebung (Niederdruck-Erdgasnetz) zustande.

Ü 9.6 Ordne in Abb. 145.2 den 3 Diagrammen die zugehörigen Formeln zu.

Abb. 145.1 *Erdgasentspannungsanlage*

Abb. 145.2

9.3 Adiabatische Zustandsänderung *(adiabatic change)*

Fahrradpumpe und Sternschnuppen

- Findet beim Aufpumpen eines Fahrradschlauches die Kompression schnell genug statt, erwärmt sich das Gas. Der Druck steigt.

Solche Vorgänge, bei denen kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, nennt man adiabatische Zustandsänderungen. Sie müssen schnell genug stattfinden, oder es wird durch gute thermische Isolierung der Wärmestrom in die Umgebung vollständig verhindert.

Da kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, gilt: $\Delta Q = 0$.

Aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik folgt:

$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \rightarrow \Delta U = \Delta W$ und somit $\boldsymbol{\Delta W = m \cdot c_v \, \Delta T}$

- Bei der **Kompression** ist die Arbeit ΔW positiv. Es **erhöht** sich die Temperatur im Gas.
- Bei einer adiabatischen **Expansion erniedrigt** sich die Temperatur im idealen Gas.

Abb. 145.3 ***Meteor*** *von Tscheljabinsk (Russland) am 15. Februar 2013. Die Druckwelle, die infolge der adiabatischen Verdichtung der Luft entstand, verursachte zahlreiche Schäden, vor allem zerbrochene Fenster.*

Die Adiabaten-Gleichungen:

Die Gleichungen beschreiben Kurven im *p-V*-Diagramm, die etwas steiler sind als die Hyperbeln der isothermen Zustandsänderung **(Abb. 146.1)**.

Adiabatengleichung: $p \cdot V^x = const.$

Der Exponent **κ** („kappa") wird Adiabatenexponent genannt **(Tabelle 146.1)**.

Mit Hilfe des allg. Gasgesetzes $T = \frac{pV}{nR}$ erhält man weitere Formen der Adiabatengleichung (*n und R* werden dabei ebenfalls als konstant betrachtet):

$$T \cdot V^{x-1} = const. \qquad T \cdot p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = const.$$

Abb. 146.1

	κ
einatomig	1,66
zweiatomig	1,4
mehratomig	1,33

Tabelle 146.1 ***Adiabatenexponent*** *(bei 20 °C)*

Merk & Würdig

Adiabatische Zustandsänderung:

Absolute Isolation; kein Wärmeaustausch mit Umgebung möglich

$$p \cdot V^x = const. \qquad T \cdot V^{x-1} = const. \qquad T \cdot p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = const.$$

p … Druck; $[p] = Pa$
V … Volumen; $[V] = m^3$
T … Temperatur; $[T] = K$
κ … Adiabatenexponent; $[\kappa] = 1$

Beispiel 9.5

Luftfeder

Luftfedern werden vor allem im Lkw- und Nutzfahrzeugbereich eingesetzt. Bei kurzen Schlägen auf diese Feder rechnet man mit einer adiabatischen ZÄ. Die Feder wird vor dem Einbau auf 3,9 bar aufgepumpt (Ausgangsvolumen 0,47 Liter; 20 °C).

Welches Endvolumen stellt sich ein, wenn die Luftfeder mit 11,1 bar belastet wird? (κ = 1,4; Druckangaben absolut!)

$$p \cdot V^x = const. \Rightarrow p_1 \cdot V_1{}^x = p_2 \cdot V_2{}^x \Rightarrow$$

$$V_2 = \sqrt[\kappa]{\frac{p_1 V_1{}^\kappa}{p_2}} = \sqrt[1,4]{\frac{3{,}9\ bar}{11{,}1\ bar} \cdot (0{,}47\ dm^3)^{1,4}} = \mathbf{0{,}22\ dm^3}$$

Abb. 146.2 ***Luftfederung:*** *Vorteil gegenüber Stahlfedern: Bei zunehmender Belastung härteres Verhalten, außerdem können Luftfedern elektropneumatisch angesteuert werden.*

Beispiel 9.6

Druckluftnagler

Ein Pneumatik-Nagler soll pro Schlag 50 J mechanische Energie auf den Nagel übertragen. Die auf 2 bar (Atmosphärenüberdruck) komprimierte Druckluft (27 °C) dehnt sich pro Expansionstakt auf den äußeren Luftdruck von 1 bar aus.

Auf welche Temperatur sinkt die Lufttemperatur bei der kurzen Expansion? (κ = 1,4)

Die Temperatur wird über die adiabatische Zustandsgleichung in der Form ermittelt:

$$T_1 \cdot p_1^{\frac{1\cdot x}{x}} = T_2 \cdot p_2^{\frac{1\cdot x}{x}} \Rightarrow T_2 = \frac{T_1 \cdot p_1^{\frac{1\cdot x}{x}}}{p_2^{\frac{1\cdot x}{x}}} = 300\ K \cdot \left(\frac{3\ bar}{1\ bar}\right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = \mathbf{219\ K}$$

Die Luft kühlt auf unter **–54°C** ab! (Die Luft sollte allerdings trocken sein, um Funktionsstörungen durch Eisbildung zu verhindern. Kompressoren sind deshalb mit Vorrichtungen zur Lufttrocknung versehen.)

Abb. 146.3 *Druckluftnagler*

Beispiel 9.7

Adi Frost will Lebensmittel auf schnellem Weg mit Hilfe einer CO_2-Patrone tiefgefrieren. Adi Frost nimmt an, dass die Expansion, weil sie schnell erfolgt, rein adiabatisch ist. Die Wärmemenge, die bei der Expansion der Umgebung entzogen wird, kann Adi mit den Formeln in seinem NAWI-Buch berechnen. Er erhält für eine Patrone etwa **(–)60 J.** Dies ist sehr wenig.

Hat Adi Frost etwas falsch gemacht?

Ja! Adi ging bei seiner Berechnung davon aus, dass CO_2 ein **ideales Gas** ist!

Tatsächlich wird CO_2 in **Flüssig**gaspatronen gehandelt! Flüssigkeiten können nicht mit den Gasgesetzen „behandelt" werden!

Das austretende CO_2 gefriert zu Trockeneis. Bei der Verdampfung von Trockeneis werden 570 kJ/kg Energie der Umgebung entzogen. CO_2 eignet sich daher sehr wohl zum Kühlen von Lebensmitteln (Stichwort „Schockfrosten" mit kryogenen Gasen).

Zusätzlich wirkt ein weiterer Effekt, der **Joule-Thomson-Effekt**.

Abb. 147.1 ***Transport kryogener Gase;*** *CO_2 kann tatsächlich zum Kühlen verwendet werden: In großen Flüssiggasbehältern wird es vor allem im Lebensmittel- und medizinischen Bereich eingesetzt.*

Übungen

Wenn du die folgenden Aufgaben löst, dann kannst du zum Thema adiabatische Zustandsänderungen Diagramme interpretieren, Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 9. 7 **Superman:** Angenommen, Superman kann mit seiner Atemluft tatsächlich durch „Schockgefrieren" helfend eingreifen – welchen Druck müssten seine Lungen dazu aufbringen? **Voraussetzungen:** Adiabatische Expansion auf 1 bar von 37 °C auf –30 °C, ($\kappa = 1{,}4$).

Ü 9.8 In einem **Dieselmotor** wird Luft schnell (adiabatisch) komprimiert. Durch die entstehende hohe Temperatur kommt es zur Selbstentzündung des eingespritzten Kraftstoffs. Kann die Zündtemperatur von Diesel (250 °C) bei einem Kompressionsverhältnis von 20 : 1 erreicht werden? (2,1 Liter Ausgangsvolumen, 1 bar, 55 °C, $\kappa = 1{,}4$)

Ü 9.9 *Different change: You see two kinds of changes from gas in the p-V-diagram of* **Abb.146.1**. *Calculate the missing values of the pressure for the adiabatic change.* *(1 mol, $\kappa = 1{,}33$, $V_1 = 2\ dm^2$; $V_2 = 7\ dm^2$; $T_1 = 293$ K).*

9.4 Kreisprozesse *(processes in closed cycles)*

Wärmekraftmaschinen wie die „gute alte Dampfmaschine", aber auch beispielsweise der Dieselmotor oder die Dampfturbine – sie alle arbeiten nach den gleichen Prinzipien:

- Sie arbeiten periodisch.
- Sie wandeln zugeführte Wärme in mechanische Arbeit um.
- Das Arbeitsgas durchläuft dabei **(Abb. 148.1)** einen Kreisprozess. (Dampf kühlt sich z. B. beim Durchlaufen einer Turbine ab, danach erreichen die Zustandsgrößen (p,V,T) wieder den Anfangszustand am Beginn der Erwärmung).
- Im p-V-Diagramm ergibt sich eine **geschlossene Kurve**.

Abb. 147.2 SADI CARNOT

9.4.1 Der Carnot'sche Kreisprozess *(the Carnot cycle)*

Sadi Carnot[1)] hat 1824 den wohl wichtigsten idealen Kreisprozess der Wärmelehre behandelt. Bei diesem Gedankenexperiment wird ein Ideales Gas einer Folge von adiabatischen und isothermen Zustandsänderungen unterworfen.

[1)] NICOLAS LÉONARD SADI CARNOT (1796 Paris – 1832 Paris), französischer Physiker und Ingenieur. Für Carnot war Wärme noch geprägt von der Vorstellung als „Wärmestoff". Durch seine theoretischen Untersuchungen an Dampfmaschinen begründete Carnot die Thermodynamik. „Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice." – „Überall, wo ein Temperaturunterschied besteht, kann die Erzeugung von bewegender Kraft stattfinden."

Experiment

Gedankenexperiment Carnotprozess

Zu **Abb. 148.1**: Ein Gas wird im p-V-Diagramm von

- 1 → 2 **isotherm expandiert bei der höheren Temperatur T_1** – dabei muss Wärme zugeführt werden.
- 2 → 3 **adiabatisch expandiert.**
- 3 → 4 **isotherm komprimiert bei der tieferen Temperatur T_2.** Dabei wird Wärme frei.
- 4 → 1 **adiabatisch komprimiert** bis an den Ausgangspunkt 1.

Bei dem Vorgang wird insgesamt nach außen die Arbeit *W* verrichtet. Die Arbeit W entspricht der eingeschlossenen Fläche (grün) im *p*-*V*-Diagramm.

Die Wärmemenge Q_1 wird dabei nicht vollkommen in mechanische Arbeit umgewandelt, da die Wärmemenge Q_2 bei der isothermen Kompression 3 → 4 abgegeben wird.

Abb. 148.1 *p-V-Diagramm*

Motorprinzip:

Wird der Kreisprozess im **Uhrzeigersinn** durchlaufen, entspricht die Arbeit, die bei dem Vorgang **frei** wird, dem Flächeninhalt der geschlossenen Kurve im *p*-*V*-Diagramm (sie hat also ein negatives Vorzeichen).

Wärmepumpe:

Bei der **Umkehrung**, also beim Durchlauf gegen den Uhrzeigersinn, muss dem Prozess Arbeit zugeführt werden (mehr über Wärmepumpen in **Kapitel 9.4.3**).

Wirkungsgrad des Carnotprozesses:

Beim Carnotprozess wird nur im Takt 1 → 2 Wärme (Q_1) von außen zugeführt um die Nutzarbeit W zu leisten. Der theoretische thermodynamische Wirkungsgrad ergibt sich (ohne Beweis) mit:

$$\eta = \frac{W}{Q_{Zu}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad \eta < 1$$

T_1 … ist die obere Temperatur des Gases; $[T_1] = K$
T_2 … ist die untere Temperatur des Gases; $[T_2] = K$

Dabei wird vorausgesetzt, dass die abgegebene Wärme Q_2 im Takt 3 → 4 nicht weiter genutzt wird. Der Carnot-Wirkungsgrad ist dann groß, wenn die Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ hoch ist. Für Wärmekraftmaschinen wird man also anstreben

- die Kühltemperatur T_2 klein zu halten und
- die Arbeitstemperatur T_1 möglichst hoch zu halten.

In der Praxis ist der Wirkungsgrad eines **realen** Kreisprozesses noch kleiner als der thermodynamische Wirkungsgrad *η*, da zusätzliche Anlagenverluste (z. B. durch Reibung in einem Getriebe) anfallen.

Abb. 148.2 *Struktur der Energieströme beim Carnotprozess*

Perpetuum mobile, gibt es das?

Der Wirkungsgrad ist prinzipiell **kleiner als 1**!

Begründung: In $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ kann T_2 nur größer als 0 K eingesetzt werden!

Schließlich steht kein Kühlmedium mit der Temperatur des Absoluten Temperaturnullpunkts von 0 K zur Verfügung. In der Praxis wird als Kühlmedium die umgebende Luft oder Kühlwasser (beispielsweise von Flüssen) benutzt. Der Wirkungsgrad erreicht damit nicht einmal annähernd 100 % **(Abb. 149.1)**.

Das Resultat des Carnot'schen Kreisprozesses gilt allgemein für beliebige Kreisprozesse. Damit ist auch **ausgeschlossen**, dass es ein **Perpetuum mobile**[1] geben kann.

Abb. 149.1 ***Abhängigkeit des thermo-dynamischen Wirkungsgrads:*** *Nach rechts wird die obere Prozesstemperatur T_1 aufgetragen. Für die beiden Funktionsgraphen wurden Kühltemperaturen T_2 mit 17 °C und 77 °C gewählt.*

Abwärme, Wärmeauskopplung

Bei **jedem** Kreisprozess wird stets Energie nach außen in Form von Abwärme abgegeben. Dies ist grundsätzlich unvermeidbar! In der Praxis kann diese als „Abwärmeauskopplung" teilweise genutzt werden, beispielsweise für Heizzwecke. In diesem Fall wird der Gesamtwirkungsgrad der Anlage größer (aber er bleibt unter 100 %).

Beispiel 9.8

Dampfturbine

Dampf wird im Kessel auf 250 °C überhitzt und einer Hochdruck-Turbine zugeführt **(Abb. 149.2)**. In der sich anschließenden Niederdruckturbine kühlt Kühlwasser im Kondensator den Dampf auf 55 °C ab. Der Dampf wird dabei kondensiert und kann in flüssigem Zustand zurück zum Kessel gepumpt werden, um wieder aufgeheizt zu werden.

Abb. 149.2 *Schema eines kalorischen Kraftwerks mit Dampfturbine*

Gesucht ist der theoretisch maximal mögliche (Carnot-)Wirkungsgrad dieser Dampfturbine.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{523\,K - 328\,K}{523\,K} = \mathbf{0{,}371}$$

Der Wirkungsgrad beträgt etwa **37 %**.

Merk & Würdig

- **Arbeit:** Dem Flächeninhalt innerhalb der geschlossenen Kurve im *p-V*-Diagramm entspricht die Arbeit, die bei einem Kreisprozess verrichtet wird (bei Durchlauf **im Uhrzeigersinn**).
- **Theoretischer thermodynamische Wirkungsgrad η:**

$$\eta = \frac{W}{Q_{Zu}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad \eta < 1 \qquad [\eta] = 1$$

T_1 … die obere Temperatur des Gases; $[T_1] = K$;
T_2 … die untere Temperatur des Gases; $[T_2] = K$

[1] Das **Perpetuum mobile** (lat. = *„ewig bewegend"*) „gibt" es in zwei Versionen:
1. Art: Es soll dauernd Arbeit verrichten, ohne dass von außen Energie zugeführt wird – dies stünde im Widerspruch zum EES.
2. Art: Es verwandelt periodisch Wärme vollständig in Arbeit. Das wäre nicht im Widerspruch zum EES! Der Carnotwirkungsgrad lässt diese Maschinen aber nicht zu. Diese Wundermaschinen waren Gegenstand heftigster Diskussionen. Bis heute soll es Leute geben, die versuchen Perpetua mobilia zu konstruieren … :)

Übungen

Wenn du die folgenden Aufgaben löst, dann kannst du zum Thema thermodynamischer Wirkungsgrad Diagramme erstellen, Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen!

Ü 9.10 **Verbrennungsmotor:** Bei 1 700 °C liegt die Verbrennungstemperatur, die Abgastemperatur liegt bei 600 °C.

a) Gesucht ist der theoretische (Carnot-)Wirkungsgrad.

b) Welche Arbeit kann pro Umdrehung (theoretisch) geleistet werden, wenn pro Zyklus 0,5 g Treibstoff (Heizwert 43 MJ/kg) verbrannt werden?

c) Welche (theor.) Leistung erbringt der Motor bei 1 000 U/min?

Ü 9.11 **Gasturbine:** Bei der Feuerung entstehen 1 200 °C heiße, äußerst energiereiche Abgase. Sie strömen mit großer Geschwindigkeit in die Gasturbine und treiben deren Schaufelräder an.

a) Wie groß ist der Carnot-Wirkungsgrad? (Abkühlung der Abgase auf 180 °C)

b) Auf welchen Wert müsste man die Feuerungstemperatur erhöhen, um den (theor.) Carnot-Wirkungsgrad um 10 % zu verbessern?

Ü 9.12 Ergänze **Abb. 149.1**: Skizziere einen Funktionsgraphen für den **thermodynamischen Wirkungsgrad bei 400 °C**.

Ü 9.13 *An inventor claims to have constructed a cyclic engine operating between two reservoirs at a temperature of 490 K and 340 K respectively. In each cycle, the engine extracts 8 000 J of energy from the high-temperature reservoir and rejects 5 200 J of energy to the low temperature reservoir, while performing 2 800 J of work on the surroundings. Would you be prepared to give financial support to the project?* ***(Justify your answer with calculations!)***

Abb. 150.1

Abb. 150.2 *Die hier dargestellten Kolben bewegen sich im Zylinder auf und ab. In dieser Anordnung (Reihenmotor) treiben die Kolben die unten liegende Kurbelwelle an.*

Abb. 150.3 *NIKOLAUS AUGUST OTTO*

9.4.2 Wärmekraftmaschinen *(heat engines)*

Gas geben!

Um ein Auto zu beschleunigen muss man „Gas geben". Damit ist das Nötigste schon formuliert: Man benötigt einen Zylinder, einen Kolben und ein heißes Gas. Das Grundprinzip bei allen Wärmekraftmaschinen lautet nun: **Expandieren** eines Gases bei **hoher Temperatur** – **Komprimieren** bei **niedriger Temperatur**. Dieser Prozess verläuft periodisch (siehe Carnot'scher Kreisprozess, **Kapitel 9.4.1**). Dabei wird die ungeordnete Wärmeenergie in geordnete mechanische Bewegungsenergie des Kolbens umgewandelt.

Man unterscheidet:

- Maschinen, bei denen durch **innere Verbrennung** kalorische Energie zugeführt wird, beispielsweise im **Verbrennungsmotor** (*combustion engine*).
- Maschinen, die **externe Wärme** in mechanische Energie umwandeln. Sie verwenden Dampf oder heiße Luft als Arbeitsmittel. Beispiele dafür sind die Dampfmaschine und der Warmluftmotor (Stirlingmotor).

Die bekanntesten Pioniere im Motorenbau waren Nikolaus August **Otto**[1] und Rudolf

[1] NIKOLAUS AUGUST OTTO (1832 Holzhausen, Nassau – 1891 Köln), deutscher Kaufmann und Erfinder des nach ihm benannten Verbrennungsmotors (1862, 1864 verwirklicht). 1864 gründete er die Deutzer Fabrik.

Diesel.

Otto-4-Taktmotor *(four stroke engine)*

Ansaugen – Verdichten – Arbeitstakt – Ausstoßen.

Diese vier Hubbewegungen des Kolbens werden als Takte bezeichnet. Sie werden in **Abb. 151.1** erklärt und dargestellt. Nur im **Arbeitstakt** leistet der Motor mechanische Arbeit. Werden mehrere Zylinder kombiniert, läuft der Motor runder **(Abb. 150.2)**.

Dieselmotor *(compression-ignition engine)*

Otto- und Dieselmotor unterscheiden sich in einigen Details:

Ottomotor	Dieselmotor
Luft-Benzingemisch wird angesaugt und verdichtet.	Luft wird angesaugt und verdichtet.
Fremdzündung (durch Zündkerze)	**Selbstzündung** wenn der Dieselkraftstoff in die komprimierte, heiße Luft eingespritzt wird.
Wirkungsgrad 16 bis 35%	Wirkungsgrad 25 bis 40 %

Merk & Würdig

Grundprinzipien aller Wärmekraftmaschinen:

- Expandieren eines Gases bei hoher Temperatur und Komprimieren bei niedriger Temperatur.
- Expansion und Kompressionsprozesse verlaufen **bei Motoren periodisch**.
- Expansion und Kompressionsprozesse verlaufen **bei Turbinen räumlich getrennt**.
- ungeordnete Wärmeenergie wird teilweise in geordnete mechanische Bewegungsenergie umgewandelt.

Arbeitsdiagramm eines 4-Taktmotors

Ansaugen	Verdichten und Zünden	Arbeitstakt	Ausstoßen
Der Zylinder wird mit Luft und Brennstoff gefüllt.	**Verdichten:** Der Kolben drückt die Füllung zusammen. **Zünden:** Kurz vor dem oberen Totpunkt wird das Gemisch gezündet.	Die heißen Brenngase treiben den Kolben, der dabei Arbeit leistet, hinunter.	Die Brenngase werden ausgestoßen.
1. Takt E Z A Ansaugtakt	2. Takt E Z A Verdichtungstakt	3. Takt E Z A Arbeitstakt	4. Takt E Z A Auspufftakt
p; 35 bar; unterer Totpunkt; oberer Totpunkt; 1; V	p; 35 bar; Zündung; 2; V	p; 35 bar; 3; V	p; 35 bar; 4; V

Abb. 151.1 ***Arbeitsdiagramm:*** *Die Arbeitsdiagramme zeigen den jeweiligen Takt im p-V-Diagramm. Der Flächeninhalt der gelb unterlegten Flächen ist ein Maß für die mechanische Arbeit. Die obere Fläche wird im Uhrzeigersinn durchlaufen und zeigt die vom Zylinder verrichtete Arbeit, die frei wird. Die untere kleinere Fläche stellt die Energie dar, die aufgewendet werden muss.*

Ergänzung & Ausblick

Turbolader *(turbo-charger)*

Der Dieselmotor wird zumeist mit einem Turbolader kombiniert **(Abb. 152.1)**. Turbos werden bei Diesel- und Ottomotoren zur **Leistungssteigerung** eingesetzt.

Funktion:

- Ein Schaufelrad wird durch die noch heißen Abgase angetrieben.
- Das Drehmoment dieses Abgas-Turbinenrades treibt eine weitere Turbine an derselben Achse an.
- Die zweite Turbine verdichtet die Ansaugluft. Diese „Ladeluft" wird zusätzlich gekühlt, so dass dem Zylinder mehr Luftsauerstoff für die Verbrennung (und daher mehr Leistung) zur Verfügung steht.

Abb. 152.1 *Prinzipzeichnung Turbolader*

Billiger in der Anschaffung, höhere Betriebskosten.	Teurer in der Anschaffung. (Einzelne Komponenten sind sehr hohem Druck und hoher Temperatur ausgesetzt.)

Tabelle 151.1

Abb. 152.2 *Einbau des Turbinenläufers einer Dampfturbine in einem kalorischen Kraftwerk. Man kann erkennen, dass der Durchmesser der Turbine im Mittelteil kleiner ist. Dort wird der heiße Dampf zugeführt. Er strömt nach rechts und links, dabei dehnt er sich aus (entspannt) und verrichtet an den Turbinenschaufeln Arbeit.*

Dampf- und Gasturbinen *(steam turbines and gas turbines)*

In Dampf- und Gasturbinen bewirken Dampf oder heißes Verbrennungsgas (Arbeitsmittel) an den Turbinenschaufeln ein Drehmoment. In der Turbine laufen dieselben Vorgänge wie im Kolbenmotor ab: Ansaugen, Verdichten, Verbrennen und Ausstoßen. Allerdings finden die Takte zugleich und kontinuierlich in den verschieden Bereichen der Wärmekraftmaschine statt.

Abb. 152.3 ***Gasturbinen-Strahltriebwerk:*** *Einsatz in gasgefeuerten Kraftwerken, im Hubschrauber und für Flugzeuge (dort wird vor allem der Rückstoß der Verbrennungsgase ausgenützt).*

Thema & Gesellschaft

Thema Wärmekraft auf dem Prüfstand

PS-starke, großvolumige Motoren waren jahrzehntelang Synonym für wirtschaftlichen Aufschwung und für das Gefühl von Freiheit auf vier Rädern. Heute wird unsere energiehungrige und immerzu mobile Gesellschaft unterwegs auf der Straße des Fortschritts abrupt ausgebremst. Verantwortlich dafür ist eine Folge von „Schlaglöchern". Die Schlagwörter dafür kann man bald nicht mehr hören, so bekannt sind sie: CO_2 als Treibhausgas, Feinstaubbelastung, nicht erneuerbare Energiequelle Erdöl, ökologischer Fußabdruck, Nachhaltigkeit, …

In den nächsten Jahrzehnten wird sich etwas ändern müssen. Anzeichen dafür sind erkennbar, beispielsweise:

- Die schlechte Energieeffizienz von Wärmekraftmaschinen wird verbessert durch Wärmeauskopplung (Nutzen der Abwärme von Kraftwerken).
- Bei Hybridfahrzeugen wird die Bremsenergie genutzt.
- Direkte Energieumwandlung der Sonnenenergie durch Photovoltaik. Damit wird der Umweg über Wärmekraftmaschinen mit ihrem schlechten Wirkungsgrad vermieden.
- Was fällt dir noch ein?

Die Turbine besteht aus **feststehenden Leitschaufeln**, die das Arbeitsmittel im optimalen Winkel auf die schnell **drehenden Laufschaufeln** lenken. Im letzten Teil der Turbine

Experiment

Gedankenexperiment Umkehrung des Carnotprozesses

Beim inversen Carnotprozess werden im p-V-Diagramm die Zustandsänderungen gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen. Dabei wird Wärme vom niedrigeren Temperaturniveau zum höheren transportiert. Dies ist nur möglich, wenn mechanische Arbeit geleistet wird.

Abb. 153.1 *„Sadi Carnot" spielt mit einer Fahrradpumpe … und entdeckt dabei, wie man Wärme dazu bringen kann, von „warm" zu „kalt" zu gelangen.*

kleines Bild: *p-V-Diagramm des inversen Carnotprozesses.*

wird auf die Rotorblätter ein antreibendes Drehmoment ausgeübt. Dabei dehnt sich das Arbeitsmittel aus und der Druck verringert sich (Entspannung). Die Durchmesser der Turbinenräder werden stufenweise größer, damit das Gas noch weiter Energie abarbeiten kann.

9.4.3 Wärmepumpe und Kältetechnik *(heat pump and cold technology)*

Die Wärmepumpe

Die Wärmepumpe nutzt (ähnlich wie der inverse Carnotprozess) Wärmequellen mit

Abb. 153.2 ***Prinzip einer Wärmepumpe:*** *Das* ***Arbeitsmittel*** *(z. B. Ammoniak – NH_3) nimmt bei niedrigem Druck- und Temperaturniveau Wärme auf, dabei verdampft es. Bei einem höheren Druck- und Temperaturniveau wird Wärme wieder am Kondensator bei der Verflüssigung abgeben.*

Abb. 153.3 *Schema der Energieströme*

Abb. 153.4 ***Erdkollektoren*** *(oben) oder* ***Erdsonden*** *(unten) zur Versorgung der Wärmepumpe mit Erdwärme.*

niedriger Temperatur, um Wärme auf höherer Temperatur abzugeben. Eine Wärmepumpe „pumpt" beispielsweise aus dem relativ gesehen warmen Grundwasser (ca. 10 °C) Wärme in die Fußbodenheizung eines Hauses **(Abb. 153.4)**. Dabei wird das Grundwasser abgekühlt. Bei Wärmepumpen setzt man ein Arbeitsmittel ein, das bei den Druck- und Temperaturverhältnissen wie sie im Betrieb vorgesehen sind, verdampft bzw. kondensiert.

Dadurch steigert man die Effizienz.

Einsatzmöglichkeiten:
Wärmepumpen werden für Raumheizungen, für Brauchwassererwärmung sowie zur Wärmerückgewinnung eingesetzt. Damit kann fossile Energie eingespart werden. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass zum Betrieb der Wärmepumpe elektrische Energie notwendig ist.

Warm anziehen!

Kältemaschinen, Kühlschränke oder Klimaanlagen nutzen das gleiche Prinzip wie Wärmepumpen. Das kalte Arbeitsmittel entzieht dem Kühlgut bzw. der Raumluft Wärme. Diese Wärme wird dann auf einem höheren Temperaturniveau als Abwärme freigesetzt.

Der Wirkungsgrad von Wärmepumpen und Kältemaschinen wird besser durch den Begriff „**Leistungszahl**" charakterisiert:

Hinweis:
In der Praxis kann bei Bedingungen wie im **Beispiel 9.9** mit einer realen Wärmepumpenzahl von etwa 4 gerechnet werden. Eine Ursache für diesen geringeren Wert liegt vor allem in den Wärmeübergängen im Wärmetauscher: Das Arbeitsmedium am Wärmetauscher des Verdunsters sollte deutlich kälter sein, damit Wärme gut übertragen wird; am Kondensator sollte das Arbeitsmedium deutlich heißer sein, damit Wärme gut an den Boiler abgegeben wird.

Leistungszahl *(coefficient of performance)*	
Wärmepumpe	**Kältemaschine**
Im Zähler steht die abgegebene Nutzwärme Q_1 **(Abb. 153.3)**. Im Nenner steht die dafür notwendige mechanische Arbeit: $\varepsilon_W = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$ Q_1 … abgegebene Nutzwärme mit Temperatur T_1 ε_W … theoretische Leistungszahl T_1 … obere Temperatur; $[T_1] = K$ T_2 … untere Temperatur; $[T_2] = K$	Im Zähler steht jene Wärmemenge Q_2, die dem Kühlgut entzogen wird und dem Arbeitsmedium zugeführt wird. Im Nenner steht die dafür notwendige mechanische Arbeit: $\varepsilon_K = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$ Q_2 … dem Kühlgut entzogene Wärmemenge ε_K … theoretische Leistungszahl $T_1 > T_2$

Die theoretische Leistungszahl von Wärmepumpen ist höher, wenn

- die Temperatur des kalten Temperaturniveaus T_2 (z. B. Grundwasser) relativ hoch ist und
- die Temperatur des warmen Temperaturniveaus T_1 (z. B. Vorlauftemperatur der Zentralheizung) relativ niedrig ist.

Wärmepumpen sind daher nur bedingt einsetzbar, z. B. für Niedertemperaturheizungssysteme (Fußbodenheizung).

Beispiel 9.9

Leistungszahl einer Wärmepumpe

Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe entzieht der Kellerluft (17 °C) Wärme und speist damit einen Warmwasser-Boiler (55 °C, Anschlussleistung 1,3 kW).

a) Zu berechnen ist die theoretische Leistungszahl.

b) Der Hersteller garantiert eine Wärmepumpenzahl von ε = 3,7. Welche Heizleistung bietet eine solche Wärmepumpe? Wie viel Liter Wasser können damit in 2 Stunden von 10 °C auf 55 °C erwärmt werden?

a) $\varepsilon_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{328\,K}{328\,K - 290\,K} = \mathbf{8{,}6}$

Die Leistungszahl beträgt 8,6.

Das bedeutet, dass theoretisch aus 1 kWh elektrischer Energie 8,6 kWh Wärmeenergie „gewonnen" werden können. In der Praxis liegt die Leistungszahl bei etwa 4 (siehe Hinweise in der Randspalte).

b) $\varepsilon_W = \frac{Q_1}{W} = \frac{P_{ab} \cdot t}{P_{El} \cdot t} \Rightarrow \mathbf{P_{ab}} = \varepsilon_W \cdot P_{El} = 3{,}7 \cdot 1{,}3\,kW = \mathbf{4{,}8\,kW}$

P_{El} … elektr. Anschlussleistung

P_{ab} … abgegebene Heizleistung

$P_{ab} = \frac{Q_1}{t} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} \Rightarrow \mathbf{m} = \frac{P_{ab} \cdot t}{c \cdot \Delta T} = \frac{4{,}8\,kW \cdot 2 \cdot 3600\,s}{4{,}2\,kJ/kgK \cdot 45\,K} = \mathbf{183\,kg}$

Etwa 180 Liter Wasser können erwärmt werden.

Höllen-Pumpe

"WARUM IST ES DENN PLÖTZLICH SO KALT?"

"WEIL DIE DA UNTEN IHR HÖLLENFEUER JETZT MIT EINER WÄRMEPUMPE ERZEUGEN!"

Abb. 154.1

Beispiel 9.10

Gefrierschrank

In einem Gefrierschrank soll bei einer Außentemperatur von 30 °C eine Innentemperatur von –25 °C erreicht werden.

a) Welcher „Wirkungsgrad“ (theoretische Leistungszahl) ist möglich?

b) Angenommen, die praktische Leistungszahl bei Realbedingungen beträgt 2,5. Welche Wärmemenge kann dem Innenraum entzogen werden, wenn das Kühlaggregat eine Anschlussleistung von 150 W hat und ½ Stunde ohne Unterbrechung „läuft“?

a) $\boldsymbol{\varepsilon_K} = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{248\ K}{(303 - 248)\ K} = \mathbf{4{,}51}$

Die theoretische Leistungszahl liegt bei 2,4. (Die Leistungszahl unter Realbedingungen ist kleiner!)

b) $\mathbf{W} = P \cdot t = 150\ W \cdot 1800\ s = \mathbf{0{,}27\ MJ}$

$\boldsymbol{\varepsilon_K} = \frac{Q_2}{W} \Rightarrow \mathbf{Q_2} = W \cdot \varepsilon_K = \mathbf{0{,}68\ MJ}$

In einer halben Stunde werden **0,68 MJ** Wärme nach außen „gepumpt“.

Abb. 155.1 *Kühlprinzip eines Kühlschranks*

Übungen

Wenn du die folgenden Aufgaben löst, dann kannst du zum Themenkreis Kühlschrank und Energieeinsparung mit Wärmepumpen Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen!

Ü 9.14 **a)** Berechne die theoretische Leistungszahl eines Kühlschranks, der bei einer Raumtemperatur von 20 °C im Tiefkühlfach eine Temperatur von –10 °C erreicht.

b) Welche elektrische Leistung müsste der Kühlschrank aufweisen, damit er dem Gefriergut in 20 Minuten 500 kJ entziehen kann?

c) Schlag eine Reihe von Maßnahmen vor, die die Effizienz eines Kühlschranks erhöhen können. (Vergleiche deine Ergebnisse mit Angaben, die du auf Konsumentenseiten im Internet findest!)

Ü 9.15 Für ein Haus wird pro Tag eine Energie von 100 kWh benötigt. Vergleiche die Kosten folgender Heizsysteme:

a) Mit einer Elektroheizung werden 100 % der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. 1 kWh kostet 0,23 €.

b) Ölheizung: 80 % der Primärenergie wird für die Wärme genützt. 1 Liter Heizöl ($\rho = 860\ kg/m^3$) kostet 1,05 €. Heizwert: 38 MJ/kg.

c) Elektrische Wärmepumpe (praktische Leistungszahl $\varepsilon = 3{,}5$); 1 kWh kostet 0,24 €.

Ü 9.16 A ***heat pump*** *consumes 1500 watts of power. Running continuously, how much heat does it deliver to the inside of a house in one hour, if the coefficient of performance is 3?*

Wenn du die folgenden Aufgaben löst und die Fragen beantwortest, dann kannst du zum Themenkreis Ökologie und Umwelttechnik Zusammenhänge erklären.

Ü 9.17 Finde zum Abschnitt **„Wärmekraft auf dem Prüfstand“** (Seite 152 unten) Antworten auf folgende Fragen; formuliere in einfachen, vollständigen Sätzen:

a) Was versteht man unter ökologischem Fußabdruck?

b) Was versteht man unter Nachhaltigkeit?

c) Auf welche Weise kann Bremsenergie bei Kraftfahrzeugen genutzt werden?

d) Was versteht man unter Wärmeauskopplung? (Tipp: Möglicherweise willst du Suchmaschinen im Internet zu Rate ziehen.)

Ü 9.18 **a)** Die Effizienz einer Wärmepumpe wird verbessert durch

- ☐ möglichst großflächige Wärmetauscher.
- ☐ niedrige Temperaturen.
- ☐ Einsatz von Kompressoren mit geringer Leistung.
- ☐ Abschalten bei zu kleiner Leistungszahl.

b) Bei einem herkömmlichen Kühlschrank

- ☐ verdampft das Kältemittel im Kondensor in den Kühlschlangen der Rückwand.
- ☐ dient das Expansionsventil dazu, dass im Fall von Überdruck Kältemittel frei gesetzt wird.
- ☐ hat der Kompressor die Aufgabe durch Drucksteigerung das Kältemittel aufzuheizen.
- ☐ wird die Rückwand und die Umgebung des Kühlschranks abgekühlt.

Abb. 155.2

10 Wärmetransport

In diesem Kapitel geht es um

- Wärmeleitung
- Strahlung
- Treibhauseffekt
- Alternativenergien

Wann immer eine Temperaturdifferenz besteht, wird Wärme(energie) fließen. Sie fließt einmal langsam (durch die Isolation eines Kühlschranks) oder schnell (beim Kochen). Der Transport von Wärme ist allgegenwärtig: die wärmenden Strahlen der Sonne, der warme Pullover im Winter, die Thermoskanne, die Zentralheizung …

An den Berührungsflächen der Körper stoßen die rasch bewegten Teilchen des heißen Körpers gegen die langsameren des kalten Körpers. Die dabei zwischen den Teilchen übertragene Energie heißt **Wärme Q** (*heat*). Der heiße Körper gibt die Energie $\Delta E = Q$ ab, die der kalte Körper aufnimmt.

Merk & Würdig

Unter einem **Energietransport durch Wärme** *(heat transfer)* versteht man den Übergang von Energie zwischen zwei Körpern auf Grund der ungeordneten Molekularbewegung (thermische Bewegung) oder durch Wärmestrahlung.

10.1. Die drei Übertragungsarten der Wärme

10.1.1 Die Wärmeleitung

Bei der **Wärmeleitung** wird Wärme zwischen benachbarten Teilchen eines Körpers durch Schwingung übertragen.

Man unterscheidet gute Wärmeleiter wie Silber, Kupfer und andere Metalle von schlechten Wärmeleitern wie etwa Luft, Holz oder Glaswolle, die der Wärmeisolation dienen **(Band 1; Kapitel 2.3)**.

$$\mathbf{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T$$

Q … übertragene Wärmemenge; $[Q] = J$
Φ … Wärmestrom, $[\Phi] = J/s = W$
λ … Wärmeleitfähigkeit; $[\lambda] = W/mK$
A … Querschnitt; $[A] = m^2$
d … Wanddicke, $[d] = m$
Δt … Zeitspanne; $[\Delta t] = s$
ΔT … Temperaturdifferenz; $[\Delta T] = K$

Merk & Würdig

Der **Wärmestrom Φ** ist die pro Zeiteinheit übertragene Wärmeenergie.

Konvektion ist immer mit Materietransport verbunden.

Man unterscheidet zwischen freier und erzwungener Konvektion.

Freie Konvektion wird durch Temperaturunterschiede im Fluid verursacht.

Erzwungene Konvektion wird mit Hilfe von Gebläsen hervorgerufen.

10.1.2 Die Wärmeströmung

Bei der **Wärmeströmung** (Konvektion) ist der Wärmetransport mit Materialtransport verbunden. Zu den technische Anwendungen zählen beispielsweise die Übertragung von Fernwärme, die Lüftung eines PCs, die Kühlung eines Motorradmotors (Kühlrippen vergrößern die Oberfläche) oder die Wirkungsweise des Rauchfangs.

10.1.3 Die Wärmestrahlung

Durch **Wärmestrahlung (eines Schwarzen Körpers)** wird Wärme berührungsfrei durch elektromagnetische Strahlung zwischen Körpern verschiedener Temperatur übertragen **(Band 3, Kapitel 7.1)**.

a) Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{max} \cdot T = b = const$$

b) Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

λ_{max} … Wellenlänge maximaler spektraler Strahlungsdichte, $[\lambda_{max}] = m$
T … absolute Temperatur, $[T] = K$
$b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ mK
P … Strahlungsleistung, $[P] = W$
A … Fläche des strahlenden Körpers, $[A] = m^2$
$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴ (Stefan-Boltzmann-Konstante)

Merk & Würdig

Ein Körper, der die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert, heißt **Schwarzer Körper** *(black body)*.

10.2 Wärmedurchgang *(transient heat)*

Abb. 158.1 *Mit einer Infrarotaufnahme können schlecht isolierte Stellen leicht entdeckt werden.*

Tritt Wärme z. B. durch eine Wand, so sind zwei Wärmeübergänge und die Wärmeleitung durch die Wand beteiligt. Ein **Wärmeübergang** liegt dann vor, wenn an einer Grenzfläche zweier Körper eine Temperaturdifferenz besteht. Die Wärmeverluste beim Wärmeübergang über die Außenwand eines Hauses sind bei starkem Wind besonders groß. Es gibt dann keine schützende Luftschicht an der Grenzfläche.

Solche Einflüsse lassen sich durch den so genannten **Wärmedurchgangskoeffizienten u**[1] oder **u-Wert** (*u-value*) der Wand zusammenfassen. Für diese Vorgänge gelten folgende Gleichungen:

Merk & Würdig

$\Phi = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$ für Wärmeübergang
α ... Wärmeübergangszahl; $[\alpha] = W/m^2K$

$\Phi = u \cdot A \cdot \Delta T$ für Wärmedurchgang
u ... Wärmedurchgangskoeffizient, u-Wert; $[u] = W/m^2K$

Abb. 158.2 *Temperaturverlauf zu einer Mauer*

Der *u*-Wert (zu **Abb. 158.2**) lässt sich mit folgender Gleichung aus den Werten von λ und α wie folgt berechnen:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda}$$

λ … Wärmeleitfähigkeit; $[\lambda] = W/mK$
d … Dicke des Materials, $[d] = m$

u-Werte für ausgewählte Baumaterialien (in W/m²K)	
Außenwand Mauerziegel (24 cm)	1,5
Beton, Außenwand (25 cm)	3,3
Holzaußenwand (20 cm)	bis 0,20
Einfachfenster (4 mm)	5,9
Fenster (mit Wärmeschutzverglasung)	ca. 1,3
Poystyrol (10 cm)	ca. 0,35

Tabelle 158.1

Beispiel 10.1

PCs benötigen für ihre einwandfreie Funktion ausreichende Entwärmung.
Ventilatoren blasen die kühle Luft durch Kühlbleche. Welche Wärmemenge kann abgeleitet werden, wenn 30 rechteckige Kühlbleche (4 cm mal 3 cm) angenommen werden ($\alpha = 40\ W/m^2K$)?

Die an einer Oberfläche von der vorbeiströmenden Luft aufgenommene Wärmemenge ist dieselbe, die von der Oberfläche abgegeben wird.

Die Formel für den Wärmeübergang kann mit $Q = \Phi \cdot \Delta t$ kombiniert werden.

Daraus ergibt sich
$\mathbf{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \cdot \Delta t$

$\mathbf{Q} = 40\ W/m^2K \cdot (2 \cdot 30 \cdot 0{,}04\ m \cdot 0{,}03\ m) \cdot (323\ K - 303\ K) \cdot 1\ s = \mathbf{57{,}6\ J}$

Es werden in einer Sekunde ***58 J*** weggebracht.

erwärmte Luft mit 50 °C
kühle Luft mit 20 °C

Abb. 158.3 *Ventilator*

[1] Es handelt sich dabei um den bisher gebräuchlichen k-Wert. Dieser u-Wert ist in den Bauordnungen verankert.

Ergänzung & Ausblick

In Tabellenwerken findet sich im Kapitel mit der Überschrift **„Wärmeableitung bei Halbleiterbauelementen"** der Begriff Wärmewiderstand $\mathbf{R_{th}}$.

Der so genannte **Wärmewiderstand** (*heat resistance*) wird vom Hersteller eines Halbleiterbauelements, z. B. eines Transistors oder einer CPU, angegeben. Er wird in Analogie zum elektrischen Widerstand definiert. Schauen wir uns die bereits bekannte Gleichung der Wärmeleitung an:

$$Q = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$$

Man nennt den Faktor $\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d}{A}$ **Wärmewiderstand** $\mathbf{R_{th}}$ (in Analogie zum elektrischen Widerstand R).

R_{th} in Analogie zu $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$

Wir erhalten daher die einfache Gleichung $\boldsymbol{R_{th}} = \frac{d}{A \cdot \lambda}$

Der **spezifische Wärmewiderstand** $\boldsymbol{\rho_{th}}$ hängt mit dem Wärmewiderstand R_{th} wie folgt zusammen:

$$\boldsymbol{R_{th} = \rho_{th} \cdot \frac{d}{A} = \frac{d}{A \cdot \lambda}}$$

Üblicherweise wird nicht ρ_{th}, sondern sein Kehrwert $1/\rho_{th}$ angegeben.
Es ist die bereits bekannte Wärmeleitfähigkeit λ.

Das Gesetz $\boldsymbol{\Delta T = R_{th} \cdot \Phi}$ nennt man **Ohm'sches Gesetz der Wärmeleitung**.

Der Vorteil dieses Gesetzes ist es, dass Wärmewiderstände wie elektrische Widerstände parallel und in Serie geschaltet werden können **(Abb. 159.1)**. Es ist dabei gleichgültig, um welche Art von Wärmetransport es sich handelt.

Abb. 159.1 *Es gilt:* $R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3}$

Beispiel 10.2

Der Transistor 2N3055 im T03-Gehäuse werde mit 50 W betrieben.

Der R_{th}-Wert für das Halbleitergehäuse: R_{th1} = 1,1 K/W;
der des Kühlkörpers R_{th2} = 1,5 K/W.

Die Temperatur des Kühlkörpers sei 80 °C.

Welche Temperatur haben Gehäuse und Kristall?

Für die Temperatur ΔT zwischen Kristall und Gehäuse gilt, da die Wärme zuerst durch das Halbleitergehäuse und dann durch den Kühlkörper fließt:

$$\boldsymbol{\Delta T = R_{th} \cdot \Phi = \Phi \cdot (R_{th1} + R_{th2}) = \vartheta_K - \vartheta \Rightarrow \vartheta_K = \vartheta + \Phi \cdot (R_{th1} + R_{th2})}$$

(Da die Wärme „in Serie" durch die Materialien fließt, gilt wie beim elektrischen Ohm'schen Gesetz $R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$).

Für das Gehäuse gilt $\boldsymbol{\vartheta_G = \vartheta + \Phi \cdot R_{th2}}$, da jetzt nur mehr eine Wärmeleitung, nämlich die des Gehäuses, auftritt.

Setzt man die gegebenen Werte ein, so erhält man für $\boldsymbol{\vartheta_K = 220\,°C}$ und für $\boldsymbol{\vartheta_G = 155\,°C}$.

Der Transistor wird zu heiß.
Es muss noch besser gekühlt werden.

Abb. 159.2 *Transistor mit Kühlkörper*

Merk & Würdig

Spezifischer Wärmewiderstand $\boldsymbol{\rho_{th}}$

$$\boldsymbol{R_{th} = \rho_{th} \cdot \frac{d}{A} \cdot \frac{d}{A \cdot \lambda}}$$

ρ_{th} … spezifischer Wärmewiderstand; $[\rho_{th}] = W/K \cdot m$
d … leitende Strecke; $[d] = m$
A … Fläche; $[A] = m^2$

Ohm'sches Gesetz der Wärmeleitung

$$\boldsymbol{\Delta T = R_{th} \cdot \Phi}$$

R_{th} … Wärmewiderstand; $[R_{th}] = K/W$
Φ … Wärmeleistung, Wärmestrom; $[\Phi] = J/s = W$

Übungen

Mit diesen Übungen überprüfst du dein Wissen über Wärmetransport.

Ü 10.1 Ein Warmwasserboiler (V = 150 Liter Inhalt; Oberfläche A = 2,5 m², u = 0,3 W/m²K) heizt Wasser auf 80 °C auf.

a) Wie viel Energie ist notwendig?

b) Wie viel kostet dies?

c) Wie viel Energie verliert der Boiler innerhalb eines Tages, wenn kein Wasser entnommen wird? (c_w = 4183 J/kgK, Kaltwasser = 10 °C; Außentemperatur = 20 °C; 1 kWh Gas kostet 7,7468 Cent)

d) Bei einem kleinen Blockhaus mit 150 m² Außenwand wird die Holzblockwand (u_1 = 1,4 W/m²K) zusätzlich mit 5 cm Styropor (u_2 = 0,7 W/m²K) verkleidet. Wie groß ist die Verringerung des Wärmeverlustes und die dadurch erzielte Einsparung von Anfang Oktober bis Ende März, wenn eine kWh Wärme 0,06 Euro kostet? (Mittlere Innentemperatur 19 °C und mittlere Außentemperatur während dieses Zeitraums 3 °C. Der Wärmeübergang ist zu vernachlässigen.)

Ü 10.2 Warum steht folgender Hinweis im Handbuch einer CPU?

»Achtung! Eine gute Kühlung ist lebenswichtig für die Halbleiter. Das Gerät darf nie, auch nicht kurzzeitig, ohne Kühlkörper oder zu kleinen Kühlkörper betrieben werden! Wenn die Kühlung mangelhaft ist, stirbt die CPU den „Hitzetod".«

Ein Transistor (Anschlusswerte R = 8 W, U = 20 V) mit Gehäuse **(Abb. 159.2)** muss gekühlt werden. In einem Datenbuch findet man den Wert R_{th} = 1,1 K/W für den Kühlkörper, Zimmertemperatur 20 °C.

Auf welche Temperatur wird das Gehäuse aufgeheizt?

Ü 10.3 Für Niedrigenergiehäuser strebt man für das Mauerwerk einen *u*-Wert von 0,15 W/m²K und niedriger an. Die Mauer ist dann 16 cm stark. Wie stark muss eine Betonmauer (*u* = 0,60 W/m²K) mit den gleichen Dämmwerten sein?

10.3 Erwärmung des Klimas *(global warming)*

Siehe **Band 2, Kapitel 12.3**

10.3.1 Merkmale der Erwärmung *(characteristics of global warming)*

In **Band 3, Kapitel 7.4**, wurde bereits die durchschnittliche Temperatur der Erdatmosphäre mit den Strahlungsgesetzen zu 7 °C berechnet; die Meteorologen gehen von 15 °C aus. Doch die mittlere Temperatur der Atmosphäre stieg in den letzten 100 Jahren um etwa 0,6 °C. Der steilste Anstieg wurde innerhalb der letzten 30 Jahre verzeichnet.

Abb. 160.1 *Satellitenaufnahmen von Grönland*

Indizien der Erwärmung der Atmosphäre:

1. Abschmelzen des Inlandeises von Grönland

Die beiden Satellitenaufnahmen von Grönland stammen vom 1. Juli 2012 (links) und vom 12. Juli 2012 (rechts).

Weiß: nicht schmelzendes Eis
Hellrot: nicht eindeutig als Schmelzzone zu identifizieren
Rot: eindeutige Gebiete, in denen das Eis schmilzt

Bemerkenswert ist der rasante Anstieg von schmelzendem Eis innerhalb von zwei Wochen. Es ist leicht zu erkennen, dass die gesamte Oberfläche des Eisschilds schmilzt. Die Ursache ist unklar.

2. Meeresspiegelanstieg

1925 hatte Venedig nur siebenmal Hochwasser („acqua alta"), in den vergangenen Jahren gab es mehr als 50 Mal Hochwasser **(Ü 10.6)**.

Messungen mit Satelliten haben einen Meeresspiegelanstieg von 3 mm pro Jahr gemessen. Hochtechnisierte Länder könnten mit Milliardenaufwand ihre Küstenregionen schützen. Ärmere Länder (z. B. Bangladesch) oder Länder, die auf Meeresniveau liegen (z. B. die Malediven), sind (vermutlich) dem Anstieg schutzlos ausgeliefert.

3. Auftauen des Permafrostbodens[1)]

Üblicherweise sind die obersten 20 m bis 100 m des Bodens im Permafrostbereich der Alpen oder Tundrengebiete Kanadas und Russlands das ganze Jahr über gefroren. Derzeit tauen sie im Sommer vermehrt auf, was zu katastrophalen Folgen führt: Bergstürze **(Abb. 161.2)** und Muren in den Alpen und Freisetzen des in den Böden der Tundra gespeicherten Methans. CH_4 ist ein bedeutend „wirksameres" Treibhausgas als CO_2. Die Erwärmung würde noch schneller erfolgen.

4. Masseverlagerung wegen schrumpfender Eismassen

Wissenschaftler des Grazer Instituts für Weltraumforschung haben mit Hilfe der Tandem-Satelliten **GRACE** (***G****ravity* ***R****ecovery* ***A****nd* ***C****limate* ***E****xperiment*) das Schwerefeld der Erde untersucht. Dabei ist entdeckt worden, dass sich die Massen auf der Erde verschoben haben. Das an den Polen und in Grönland konzentrierte Eis verteilt sich gleichmäßig auf alle Weltmeere. Das verändert das Schwerefeld und das Trägheitsmoment der Erde **(Kapitel 6.1)**.

5. Häufung von Wetterextremen

Immer häufiger treten Wetterphänomene auf. Dazu zählen etwa Dürren (im südlichen Afrika, Nordamerika und Südamerika), Hitzewellen (in Südamerika und Europa), Wassernot (im südlichen Südamerika und im Himalaya-Einzugsgebiet), Hurrikans (in Nordamerika) und Flutwellen. Die Auswirkungen dieser wetterbedingen Katastrophen sind nicht nur verheerend für die Umwelt, sondern fordern immer wieder auch zahlreiche Menschenleben.

6. Versauerung des Meerwassers

CO_2 wird vom Meerwasser aufgenommen und reagiert zu Kohlensäure. Diese Kohlensäure greift die Kalkschalen von Korallen, Muscheln und Schnecken an, sodass diese absterben oder sich zumindest nicht vermehren.

7. Vordringen von Tropenkrankheiten

Ornithologen haben bereits seit Längerem beobachtet, dass manche Zugvögel nicht mehr über die Wintermonate in den Süden fliegen, sondern in ihren Brutplätzen überwintern. Vermutungen, auch Tropenkrankheiten könnten sich nach Norden ausbreiten, haben sich nun bestätigt (siehe nachstehenden Zeitungsartikel vom 18. März 2013).

Meeresspiegelanstieg (cm): 140, 120, 100, 80, 60, 40, 20, 0, -20; Jahr: 1900, 1950, 2000, 2050, 2100; A1FI; B1; 1990

Abb. 161.1 *Durchschnittlicher Meeresspiegelanstieg bis 2100 bei unveränderten Rahmenbedingungen (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung)*

Abb. 161.2 *Im Sommer 2012 ist das Eis um das Gipfelkreuz des Großvenedigers geschmolzen. 2002 erreichte man mit der Hand noch den Querbalken des Kreuzes.*

Thema & Gesellschaft

FORSCHER FAND GELSE MIT VOGEL-MALARIA

Forscher wiesen bei einer erst seit Kurzem in Österreich heimischen Stechmückenart einen Krankheitserreger nach, der bei Vögeln malariaähnliche Zustände hervorruft. Für Menschen ist er ungefährlich. In Hinkunft werde man dennoch ihre Bekämpfung ernster nehmen müssen, weil man akzeptieren müsse, dass Gelsen Krankheiten übertragen könnten, sagt dazu Franz Allerberger von der Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES). Der Experte stuft Ansteckungsrisiken zwar als „sehr, sehr gering", aber dennoch relevant ein.

1) Ein Boden, der das ganze Jahr über gefroren ist.

Übungen

Wenn du diese Übungen bearbeitest, beschäftigst du dich hoffentlich kritisch mit dem Treibhauseffekt.

Ü 10.4 Viele Millionenstädte befinden sich nur knapp über dem Meeresspiegel. Schätze ab, wie viele Menschen davon betroffen wären. Wie viel Prozent der Erdbevölkerung sind das? Benütze für die Beantwortung der Frage den Atlas. Beantworte zuerst diese Fragen bevor du weiterliest!

1) „Zwei Drittel der Weltbevölkerung leben weniger als 50 km von der Küste entfernt."

2) „Schätzungen der OECD gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2050 fast 2/3 der Menschheit in Küstennähe siedeln wird."

Vergleiche deine Rechnung und begründe die unterschiedlichen Werte.

Ü 10.5 Wie lange dauert es, bis der höchste Punkt der Malediven auf der Insel Wilingili mit 2,5 m nicht mehr zu sehen ist? Erlebst du das noch bei einer Lebenserwartung von 82 Jahren? Benütze dazu **Tabelle 162.1**.

Ü 10.6 Experten vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung schätzen, dass allein in der Adria rund 1 400 km Küsten von Überflutungen bedroht sind. Ein Anstieg des Meeresspiegels wird in Küstenregionen befürchtet.

a) Welche Gebiete in Europa und auf der Erde sind besonders betroffen?

b) Welche Folgen ergeben sich daraus für küstennahe Regionen, z. B. für die Nordseeküste in den Niederlanden und Deutschland, für Flussmündungen (Themse, Garonne, Elbe, etc.)?

Ü 10.7 Für eine Überschlagsrechnung der thermischen Ausdehnung des Wassers betrachte man den Atlantik als Becken mit einer durchschnittlichen Wassertiefe von 3 330 m. Um wie viel würde sich der Meeresspiegel bei einer Erwärmung

a) um 1°C

b) um 0,2°C heben,

wenn das gesamte Wasser wärmer wird (was man mit Satelliten bereits bestimmt hat)?

Hinweis: Benutze die Gleichung für die thermische Ausdehnung aus **Band 1, Kapitel 2.3.3** mit

$\alpha_{Wasser} = 18 \cdot 10^{-5}\ K^{-1}$

Ü 10.8 Auswirkungen der Erwärmung auf den Tourismus als bedeutender Wirtschaftsfaktor: Welche Auswirkungen, auch Österreich betreffend, sind das? Wieso ist das Auftauen des Permafrosts auch für Österreich von Bedeutung?

Mittlerer Meeresspiegelanstieg (1993 – 2003) & Ursachen (in mm)	
Thermische Expansion	1,7
Schmelzen der Gletscher	0,8
Schmelzen des Grönlandeises	0,3
Schmelzen des Antarktiseises	0,3
Rest	0,3
Summe	3,4

Tabelle 162.1

Abb. 162.1 *Die Erde wird gegrillt*

10.3.2 Ursachen der Erwärmung *(reasons for global warming)*

1. Treibhausgase

Hauptursache ist nach derzeitigem Wissen der Anstieg der **Treibhausgase** (***G**reen**h**ouse **G**ases; GHG*), vor allem CO_2 und CH_4. (**Tabelle 163.1** und **163.2**) Bereits 1992 in Rom haben sich Staats- und Regierungschefs fast aller Länder zum Klimaschutz bekannt. Die Temperatur sollte um maximal 2 °C steigen. Dieses Ziel wurde nicht erreicht. Notwendige Nachfolgekonferenzen 1997 in Kyoto, 1992 in Rio de Janeiro und 2012 in Duha[1] blieben ebenso folgenlos; es gab nur Absichtserklärungen, obwohl bereits eine drohende Temperatursteigerung von 4 °C befürchtet wird. Doch auch andere Ursachen sind für den Anstieg der Temperatur verantwortlich, sodass sich Synergieeffekte ergeben. Schädlich auf das Klima wirken sich vor allem der Verkehr und die Kraftwerke aus. China, USA und die EU sind für mehr als die Hälfte des CO_2-Ausstoßes verantwortlich.

CO_2-Emission pro Kopf und Jahr in Tonnen	
Katar	40
Luxemburg	21
USA	18
Österreich	8
China	6

Tabelle 163.1

CO_2-Emission in Mio. Tonnen 2010	
China	7 270
USA	5 370
Österreich	84

Tabelle 163.2

Auch Österreich hat sich verpflichtet, die Kyoto-Ziele zu erreichen. Die Realität ist allerdings anders **(Tabelle 163.3)**.

Kyoto-Vorgaben für Österreich	
Emission 1990 (in Mio. t)	78
Emission 2010 (in Mio. t)	85
Verpflichtende Änderung	–13 %
Reale Emission	+ 8,2 %
Abweichung (Prozentpunkte)	21,2

Tabelle 163.3

Das erfordert dringende Maßnahmen, dieses Ziel auch zu erreichen. Als zukünftige Absolventin bzw. zukünftiger Absolvent einer technischen Schule ist es eine Herausforderung, das Wissen, die Kreativität und das Können in den Dienst der Welt und auch Österreichs zu stellen.

Auch die Staatengemeinschaft der Erde ist von den vereinbarten Zielen weit entfernt. Der Primärenergieverbrauch 2010 betrug weltweit **564 EJ (=546.10^{18} J.)**

2. Wachsende Weltbevölkerung

Im Jahr 1804 überstieg die Bevölkerung der Erde erstmals die Milliardenmarke. Um 1900 bevölkerten bereits 1,6 Milliarden Menschen diesen Planeten. Im letzten Jahrhundert vervielfachte sich diese Zahl. 1950 betrug die Zahl drei Milliarden.

Derzeit leben rund 7,2 Milliarden Menschen auf der Erde. Jedes Jahr wächst die Erdbevölkerung um etwa 83 Millionen Menschen **(Abb. 163.1)**. Damit steigt der Bedarf an Energie und Rohstoffen an. Umso wichtiger ist es, umsichtig mit unseren Ressourcen umzugehen.

Abb. 163.1 *Anstieg der Weltbevölkerung in Milliarden mit einer Prognose für die Jahre 2025 und 2050.*

3. Motorisierter Verkehr

Seit Beginn der Motorisierung Der weltweite Autobestand **(Abb. 163.2)** ist im Steigen. Dabei fällt auf, dass die Verteilung der Autos nicht überall gleich ist; 1 000 Einwohner besitzen in Monaco 900 Autos; in den USA sind es 800 Autos. In Bangladesch sind es drei Autos; Tendenz steigend.

Doch nicht nur der private Autoverkehr hat Auswirkungen auf die Umwelt. Vor allem der Anstieg des Flugverkehrs resultiert jährlich in einem vermehrten Ausstoß von CO_2 **(Tabelle 163.4)**. Weniger schädlich sind Verkehrsmittel, die von vielen Personen gleichzeitig genutzt werden können, darunter Bahn und Bus.

Abb. 163.2 *Autobestand weltweit (in Milliarden)*

CO_2-Emission in g pro Kopf und km	
Bahn	80
Bus	20
PKW	120
Flugzeug	380

Tabelle 163.4

[1] Hauptstadt von Katar

Entwicklung des weltweiten Fleischkonsums

	1990	2007	2011
Schweinefleisch	69,9	100,2	110,2
Geflügelfleisch	40,9	86,3	101,1
Rindfleisch	55,3	65,1	64,6
Schaf- und Ziegenfleisch	9,7	13,1	13,7

Quelle: FAO

Abb. 164.1 *Fleischkonsum (in Millionen Tonnen)*

Jährlicher Verlust von Waldfläche
Angaben in 1 000 Hektar pro Jahr

1900 – 2000	2000 – 2005	2005– 2010
8 323	4 841	5 581

Quelle: FAO

Abb. 164.2 *Abholzung (in 1000 ha/a)*

4. Fleischkonsum

Auch der Fleischkonsum **(Abb. 164.1)** nimmt kontinuierlich zu. Für die Aufzucht von Vieh sind Agrarland und Futter notwendig. Rinder scheiden klimaschädliches CH_4 aus. Zudem wird Fleisch oft quer durch Europa transportiert, was wiederum einen vermehrten Ausstoß von CO_2 nach sich zieht.

5. Zerstörung des Waldes

Der Wald wird als CO_2-Senke bezeichnet. Seine Abholzung **(Abb. 164.2)** erzeugt rund ein Sechstel der Treibhausgase. Laut Weltbank wird jede Sekunde Wald in der Größe eines Fußballfeldes abgeholzt.

Thema & Gesellschaft

Thema Einfach rechnen

Der weltweite Ölverbrauch beträgt laut Angaben der Internationalen Energieagentur rund 32 Millionen Barrel pro Jahr. 1 Barrel = 159 Liter.

Die USA verbrennen rund 19 Millionen Barrel täglich. In North Dakota werden monatlich 500.000 Barrel gefördert.

Großartig. Ein Boom.

Schätzungen sprechen von 2,1 Milliarden Barrel, die laut Stand der Technik in North Dakota zu holen sind. Und wenn es 21 Milliarden wären – es wäre nicht einmal ein globaler Jahresverbrauch. So viel zur Zukunft von Öl.

4 von 90 Umweltzielen wurden seit 1992 geschafft: Schutz der Ozonschicht, bleifreies Benzin, verbesserte Wasserversorgung und weniger Wasserverschmutzung. Kaum Fortschritte gab es bei 24 Umweltzielen, und Verschlechterungen verbucht die UNEP bei acht Zielen.

50% aller Feuchtgebiete der Welt verschwanden im Lauf des 20. Jahrhunderts. In manchen Regionen gingen sogar 95 Prozent verloren.

Auf 8,1 ist der pH-Wert des Meerwassers gesunken. Ursache ist, dass sich große Mengen des steigenden CO_2-Gehalts der Luft im Wasser auflösen. Je saurer das Wasser ist, umso mehr Korallen verschwinden.

Übungen

Die folgenden Übungen regen zum kritischen Auseinandersetzen mit Informationen an.

Ü 10.9 Welche Schlussfolgerungen kann man aus dem vorangehenden Zeitungsartikel „Einfach rechnen" entnehmen?
Stimmen die Zahlen?
Wie viel Liter Rohöl verbrauchen die USA jährlich?

Ü 10.10 In **Abb.164.3** erkennt man zwei deutliche Rückgänge des Energieverbrauchs. Worauf sind sie zurückzuführen?

Weltenergieverbrauch in EJ (0–600); Jahr (1860–2020)

Abb. 164.3 *Entwicklung des Weltenergieverbrauchs*

Energieverbrauch in Österreich

Eine Steigerung des Energieverbrauchs von Österreich hat sich ab 1970 vollzogen **(Abb. 165.1)**. In den vergangenen 40 Jahren hat sich der Verbrauch an Energie in Österreich verdoppelt. 2009 sank er unter das Niveau von 2005. Die Ursachen dafür sind die Wirtschaftskrise, milde Winter und die Anhebung der Mineralölsteuer. Trotzdem ist die Wirtschaft Österreichs um 2,7 % gestiegen. Beachte den unterschiedlichen Maßstab!

In Österreich lässt sich vermehrt eine Hinwendung zu erneuerbaren Energien feststellen **(Abb. 165.3)**. Am meisten genutzt wird aber – sowohl in Österreich und auf der Welt – noch immer Erdöl **(Abb. 165.2)**.

Abb. 165.1 *Energieverbrauch in Österreich seit 1970*

Land	Anteil
Schweden	50,1 %
Portugal	35,2 %
Spanien	25,4 %
Italien	23,9 %
Deutschland	15,8 %
Frankreich	13,3 %
Großbritannien	6,1 %
Durchschnitt EU-27	17,5 %

Österreichs E-Wirtschaft ist bei erneuerbaren Energien schon heute an erster Stelle in der EU.

Abb. 165.3 *Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung (Stand 2012)*

Abb. 165.2 oben *Weltenergieverbrauch 2010 nach Primärenergiequellen*
unten *Primärenergieverbrauch Österreichs 2010 nach Energiequellen*

10.4 Mögliche Auswegsszenarien *(possible loopholes)*

Die zwei derzeit größten Herausforderungen, die die globale Völkergemeinschaft für die Zukunft zu lösen hat, sind:

- Klimaproblematik – Atmosphärenerwärmung
- Energieproblem – Knappheit der Ressourcen

Da große Energiemengen (noch immer) durch Verbrennen von fossilen Brennstoffen gewonnen werden, und damit ein Anstieg des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre verbunden ist, und da gleichzeitig die Lagerstätten dieser primären Energieträger nicht erweiterbar sind, ist ein Reduzieren der Ver(sch)wendung der Ressourcen und ein Übergang zu erneuerbaren Energieträgern auch gleichzeitig ein Reduzieren des CO_2-Anteils in der Atmosphäre.

Beide hängen zusammen. Die Lösung des Energieproblems ist auch gleichzeitig die Lösung der Klimaproblematik.

Um die Erderwärmung um die geforderten 2 °C zu beschränken, muss in den nächsten Jahren bis zu 60 % der CO_2-Ausstoß zurückgehen. Die Nationen müssen daher rund 700 Milliarden Tonnen CO_2 einsparen. Für Europa bedeutet das, in Zukunft den Strom nur mehr emissionsfrei zu produzieren und das Wirtschaftswachstum vom Energieverbrauch zu entkoppeln.

CO_2-Kreislauf

Photosynthese: $6CO_2 + 6H_2O + \text{Sonnenenergie} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$

Atmung: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{chemische Energie}$

Abb. 165.4 *Ein Großteil der Primärenergie verpufft als unvermeidliche Verluste* ***(Kapitel 9.1.3)***.

Abb. 166.1 *Energieverbrauch und Weltbevölkerung im Vergleich*

Abb. 166.2 *Das jährliche Angebot an nicht konventionellen Energieträgern im Vergleich zum Weltenergiebedarf in einer realistischen Schätzung*

Durchschnittliche Strahlungsleistung in Österreich (Einstrahlung in W/m²)	
Blauer Himmel	800 – 1000
Dunstig	600 – 900
Neblig	100 – 300
Trüber Wintertag	50

Tabelle 166.1

Wege zur Reduktion des Ausstoßes der Treibhausgase bzw. der nachhaltigen Energiebereitstellung, die derzeit diskutiert werden, sind:

- „Vergraben" des CO_2 **(Band 3, Kapitel 7.3)**
- CO_2 als Rohstoff
- GEO-Engineering **(Band 3, Kapitel 7.3)**
- Alternativenergien **(Kapitel 10.4.2)**
- Energiesparen
- Energie wirksam und wirtschaftlich nützen
- Effektive Nutzung der Ressourcen
- Neue Technologien (z. B. LEDs, Elektroautos, …)
- Verkürzung der Transportwege von Produkten des täglichen Bedarfs

Das Erschließen neuer Lagerstätten ist keine Lösung des Problems. Die Lösung wird nur um einige Jahre/Jahrzehnte verschoben. Der Abbau von Ölsanden und das Fördern von Schiefergas (Fracking) verursachen zusätzlich erhebliche Schäden an der Umwelt.

10.4.1 CO_2 als Rohstoff

Derzeit wird vermehrt über die Möglichkeit diskutiert, CO_2 als Rohstoff für Treibstoffe, Medikamente und ev. neuartige Materialien zu nützen.

Die Synthese $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ liefert Methan und ist exotherm.

Nachteil: Bei der Verbrennung entsteht wieder CO_2.

10.4.2 Beispiele erneuerbarer Energieformen

Schätzungen sprechen davon, dass mehr als 3000mal so viel Energie aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden könnte als die Bevölkerung der Erde derzeit benötigt.

Diesem großen Vorteil der praktischen Unerschöpflichkeit der erneuerbaren Energieformen stehen Schwierigkeiten beim Sammeln, Umwandeln, Speichern und Transport gegenüber.

Sonnenenergie

Durch Sonnenenergie werden der Erde **jährlich 8 · 10^{23} J** zugeführt.

Auf jeden Quadratmeter der Erde, der der Sonne zugewandt ist, fallen rund 1400 W (**Solar-Konstante**): Dieser Wert wird nur im Idealfall erreicht, wenn die Sonnenstrahlen senkrecht auf die Erdoberfläche einfallen. Sensibler Einsatz der „flächenfressenden" Kollektoren ist notwendig.

Abb. 166.3 *Gesetzliche Vorgaben für eine ausgeglichene ökologische und ökonomische Anwendung der Sonnenenergie sind notwendig.*

Formen der direkten Nutzung von Sonnenenergie				
Name	**Sonnenkraftwerk**	**Sonnenofen**	**Sonnenkollektor**	**Solarzelle, Photovoltaik**
Methode	Spiegel konzentrieren das Licht auf einen Punkt; in ihm wird Heißdampf erzeugt.	Spiegel konzentrieren Licht.	Wasser wird durch Sonnenstrahlen erwärmt; Wärmetauscher erlauben die Nutzung	Licht trifft auf Halbleiter (z. B. Si) und löst den Photoeffekt aus.
Bereitstellung von	Hochtemperaturwärme, Elektrizität	Hochtemperaturwärme	Niedertemperaturwärme	Elektrische Energie
Beispiele	SolarOne (Mojave-Wüste, Kalifornien, USA)	Odeillo (Frankreich)	Schwimmbäder, Wohnhäuser	Satelliten, Taschenrechner, Autobahntelefon, Eiswächter, Schutzhütten
	Abb. 167.1 *SolarOne: Jeder der 1818 Spiegel besitzt eine Fläche von 39,3 m² (Leistung 107 W)*	**Abb. 167.2** *Ein Sonnenofen*	**Abb. 167.3** *Sonnenkollektoren sind zu einem Standard geworden.*	**Abb. 167.4** *Notrufsäulen sind ein gewohnter Anblick auf Autobahnen*

Tabelle 167.1

Windenergie

Die Gesamtkapazität wird auf $6 \cdot 10^6$ MW geschätzt. Schon im 19. Jahrhundert wurden viele Pumpanlagen durch Windräder **(Abb. 167.5)** angetrieben. Einer intensiven Nutzung von Windenergie stehen hohe Investitionskosten bei unregelmäßiger Energiebereitstellung entgegen.

Abb. 167.5 *Ein Windpark*

Wasserkraft

Flüsse:

Speicherkraftwerke mit großem Gefälle und Laufkraftwerke mit großer Wasserführung erlauben eine indirekte Nutzung der Sonnenenergie.

Die Gesamtkapazität von $2 \cdot 10^6$ MW ist weltweit erst zu etwa 10 % genutzt. Derzeit ist ein Pumpspeicherwerk die einzige Möglichkeit, unregelmäßig anfallenden Strom zu speichern.

Z. B. wird Strom aus den Offshore-Windparks an der deutschen Nordseeküste nach Norwegen geliefert. Die dortige Landschaft bietet die entsprechenden Bedingungen.

Abb. 167.6 ***Gezeitenkraftwerk**, technische Daten: Länge der Staumauer 750 m; Oberfläche des Staubeckens: 22 km²; Volumen des Staubeckens: 184 Millionen m³; Durchflussmenge: 15 000 m³/s; Tidenhub: 12 m*

Meere:

Gezeitenkräfte **(Abb. 167.6)** können in Gezeitenkraftwerken genutzt werden. Die Kapazität beträgt ca. 10^5 MW. An der Rance (Frankreich) leistet ein Gezeitenkraftwerk 240 MW (gleiche Größenordnung wie ein Donaukraftwerk).

Mit anderen Kraftwerkstypen plant man mit einer sinnvollen Kombination in den kommenden Jahren mehr als die Hälfte des Strombedarfs zu decken.

Diese nutzen

- den Temperaturunterschied zwischen Tiefen- und Oberflächenwasser,
- den osmotischen Druck zwischen Süß- und Salzwasser,
- die Kraft der Wellen,
- die Meeresströmungen.

Bioenergie

Die Bioenergie stellt eine indirekte Nutzung von Sonnenenergie durch Verbrennung von Holz (in Form von Pellets und Hackschnitzel), Stroh, Rinde, Biogas, Biodiesel etc. dar. Dabei wird neben anderen Stoffen auch CO_2 freigesetzt (Treibhauseffekt).

Eine Abholzung für Heizzwecke, die über den jährlichen Zuwachs hinausgeht, gefährdet den Bestand des Walds und führt so zu einer Verschlechterung der ökologischen Bedingungen sowohl lokal als auch global.

Eine nachhaltige Nutzung von Bioenergie hingegen verbessert langfristig die CO_2-Bilanz, weil weniger, über Millionen Jahre gespeicherte fossile Brennstoffe verbrannt werden.

Zu den wichtigen Energiepflanzen zählen: Raps, Soja, Mais, Palmöl, Weizen, Zuckerrohr, Zuckerrübe.

Thema & Gesellschaft

Abb. 168.1 *Aus Mais wird Energie*

Thema Biokraftstoff

Mit der **Richtlinie 2009/28/EG** sollte auch in Österreich der **Biokraftstoff E10** bis Ende Oktober 2012 eingeführt werden. Der Umwelt- und Landwirtschaftsminister stoppte jedoch die Einführung.

Grund: Die Mineralölfirmen benötigen noch Zeit. Auch international regt sich Widerstand. Vor allem in den Ländern der Dritten Welt werden vermehrt Energiepflanzen angebaut. Die Anbaufläche für Mais, Weizen, Zuckerrohr als Nahrungsmittel, etc. wird kleiner, die Preise steigen und die Bevölkerung hungert.

In Österreich soll der benötigte Alkohol aus einheimischem Mais- und Weizenstroh erzeugt werden.

Geothermische Energie

Die Temperatur des Gesteins nimmt mit zunehmender Tiefe etwa um 1 °C pro 100 m zu und erreicht im Erdinneren ≈ 4500 °C.

An einigen Stellen der Erde reichen heiße Schichten bis knapp unter die Erdoberfläche, sodass heiße Quellen und Dampf genutzt werden können.

Vorteile der Geothermie sind der geringe Platzbedarf (in Altenheim, OÖ, etwa 500 m^2) sowie eine gleichmäßige und leicht regulierbare Verfügbarkeit während des ganzen Jahres. ***„Wir sitzen buchstäblich auf unserer eigenen Ressource!“*** (Werbetext der Geothermieanlage Altenheim).

Übungen

Beim Bearbeiten diese Übungen beschäftigst du dich mit alternativen Energien.

Ü 10.11 Moderne Windkraftanlagen werden nur bei Windgeschwindigkeiten zwischen 5 m/s und 90 m/s betrieben. Während des Betriebs einer Windkraftanlage wurde **Abb. 169.1** aufgenommen. Interpretiere dieses Diagramm.

Abb. 169.1

Ü 10.12 In einer Formelsammlung findet man die Gleichung für die maximale Leistung P einer Windkraftanlage:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot A \cdot v^3$$

a) Interpretiere die Gleichung!

b) Ergänze die folgenden Sätze:

Wird *A* verdoppelt, so wird *P* ____________________ .

Verdoppelt sich *v*, so steigt *P* um das ____________________ .

Ü. 10.13 Der Bürgermeister von St. Urm (Seehöhe 900 m) möchte eine Windkraftanlage bauen. Er behauptet, dass eine derartige Anlage gegenüber einer an der Küste keine geringere Leistung bringt. Sein Umweltgemeinderat behauptet, das Gegenteil. Wer hat Recht und warum?

Ü 10.14 Für den Wirkungsgrad einer Windkraftanlage findet man in der einschlägigen Literatur

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$

v_1 … Geschwindigkeit vor den Rotoren
v_2 … Geschwindigkeit nach den Rotoren

Bei welchem Geschwindigkeitsverhältnis v_2/v_1 besitzt die Windkraftanlage den maximalen Wirkungsgrad?

Abb. 169.2 *Eine Windkraftanlage*

10.4.3 Energiesparen

Natürlich ist das sorgsame Umgehen mit Energie nicht wirklich eine Energiequelle. Ein verantwortungsvoller Umgang mit Energie schont die Umwelt und entlastet das staatliche wie auch das private Budget.

Energieverschwendung und damit Einsparpotentiale gibt es viele:

- (Nachträgliche) Isolierung von Wohnhäusern, gezieltes Lüften von Wohnräumen, kein Überheizen von Räumen, Errichtung von Niedrigenergiehäusern, …
- Haushaltsgeräte brauchen weniger Energie als noch vor 12 Jahren. Sparsamer Verbrauch von Wasser, bessere Isolierung und Mikroelektronik sind für diesen Trend verantwortlich. Der vermehrte Einsatz von Haushaltsgeräten steigert allerdings den Energiebedarf wieder
- Leerlaufverluste durch fehlende Netzschalter, ständige Bereitschaft von Elektrogeräten, etc.
- Stand-by-Betrieb von Bürogeräten **(Abb. 169.3)**

Abb. 169.3

Abb. 169.4 *Anteile der Gerätegruppen an den Leerlaufverlusten in Privathaushalten*

- Bei Verwendung eines Bildschirmschoners bleibt der Prozessor immer aktiv und kann nicht in den Ruhezustand schalten.
  Übrigens: Bildschirmschoner mit bewegten 3D-Motiven brauchen deutlich mehr Strom als die Bearbeitung von Dokumenten. Daher am besten keine Bildschirmschoner verwenden.
- Übertriebene Beleuchtungsflut, Licht in menschenleeren Räumen oder am Tag, usw.

Durchschnittlicher Stromverbrauch von Elektrohaushaltsgeräten in kWh			
	Vor 20 Jahren	heute	Veränderung
Waschmaschine	3,1	2,3	– 27 %
Geschirrspüler	2,6	1,7	– 36 %
Elektroherd	1,3	1,1	– 18 %
Gefriergeräte	1,1	0,7	– 40 %
Kühlschränke	0,7	0,5	– 28 %

Tabelle 170.1

Beispiel 10.3

Autofahrerclubs empfehlen, nicht benötigte Schiträger abzumontieren, um Benzin zu sparen. Von einem Mehrverbrauch an Treibstoff wegen eines bis zu 20 % höheren Luftwiderstandes ist die Rede. Wie groß ist der Mehrverbrauch an Treibstoff bei einer Fahrt von 600 km (= eine Tankfüllung)?

Bei der folgenden Überschlagsrechnung gehen wir von folgenden Daten aus:

Durchschnittsverbrauch von 8 Liter für 100 km. 70 % des Treibstoffs werden für Überwindung des Luftwiderstands benötigt. Man braucht daher 33,6 l für 600 km.

Mit Schiträgern braucht man 1/5 Treibstoff mehr. Also **zusätzlich 6,7 l**. Das entspricht einer Fahrtstrecke von mehr als 80 km. Es zahlt sich aus, nicht benötigte Schiträger abzumontieren. Bei höherer Geschwindigkeit und/oder mit Schi am Dach wird entsprechend mehr Benzin verbraucht.

Abb. 170.1 *Skiträger auf einem Autodach*

10.4.4 Intelligente Speicherung und Verteilung

Global

Derzeit befindet sich die Elektrizitätsversorgung im Umbruch. Der steigende Energiebedarf und die verstärkte Integration von erneuerbaren Energien treiben diese Entwicklung massiv voran. Aus diesem Grund wird sich die Strominfrastruktur in Zukunft von einer zentral gesteuerten zu einer intelligenten dezentralen Stromversorgung weiterentwickeln müssen. Das soll mit Hilfe von Smart Grids **(Abb. 171.1)** sichergestellt werden.

Unter Smart Grids versteht man intelligente Energienetze, die alle Akteure eines Energiesystems über ein Kommunikationsnetzwerk miteinander verbinden. Diese Smart Grids können die anfallende Energie sinnvoll verteilen und haben die Aufgabe, einen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage herzustellen.

Kurzfristig mag die Speicherung von CO_2 die Erderwärmung verringern; auf lange Sicht ist es notwendig, das Verbrennen von fossilen Brennstoffen massiv einzuschränken.

Daheim

Intelligente Stromverteilung **(Abb. 171.2)** hilft auch im Haus Energie sparen, sodass weitgehend auf externe Energiezufuhr verzichtet werden kann. Mit guter Isolation **(Kapitel 10.1)** können bereits jetzt energieautarke Häuser errichtet werden.

Abb. 171.1 *Smart-Grid*

Abb. 171.2 *Stromverteilung im Haus*

Sonnenluftkollektoren

Ein Sonnenluftkollektor **(Abb. 171.3)** ähnelt einem Solarkollektor. Statt Wasser wird in diesem Fall Luft als Wärmeträger verwendet. Mit einer Solarzelle wird Strom produziert. Gleichzeitig wird dahinter warme Luft erzeugt, die zum Temperieren von Keller, Garagen und unbewohnten Häusern im Winter geeignet ist.

Abb. 171.3 *Das Prinzip Sonnenluftkollektor*

11 Fossile Rohstoffe

In diesem Kapitel geht es um

- Entstehung von Erdöl
- Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendung

11.1 Erdöl – ein fossiler Energieträger *(oil is a fossil fuel)*

Fossile Energieträger (*fossil fuels*) sind wichtige Rohstoffe für die chemische Industrie. Man unterscheidet

- **Kohle** (*coal* – Band 2, Seite 136),
- **Erdöl** (*petrol*) und
- **Erdgas** (*natural gas*).

Erdöl ist vor rund 150 Millionen Jahren aus **Plankton** (mikroskopisch kleine Pflanzen und Tiere im Meer) entstanden. Nach dem Sinken des Planktons auf den Meeresboden wurde dieses mit Schichten von **Sedimenten** (Sand und Schlamm) überdeckt. Unter Ausschluss von Sauerstoff wandelten Bakterien das organische Material in **Faulschlamm** um. Durch Druck und höhere Temperaturen infolge geologischer Umschichtungen kam es zu weiteren chemischen Umwandlungen und in Folge zur Bildung von Erdöl bzw. Erdgas.

Abb. 173.1 *Entstehung fossiler Rohstoffe*

Abb. 173.2 *Pipeline (Alaska)*

Abb. 173.3 *Bohrturm in Voitsdorf (Oberösterreich)*

Abb. 173.4 *Bohrmeissel mit 45 cm Durchmesser*

Thema & Gesellschaft

Schiefergas bringt Energierevolution

Schiefergas hat die USA zum größten Erdgasproduzenten gemacht, Preise und Machtstrukturen purzeln. Die industriepolitische Herausforderung für Europa ist groß – zudem wird ein riesiger Rückschlag für erneuerbare Energien und die Umwelt befürchtet.

Ursache ist der Erdgas-Boom in den USA, wo mittels einer neuen, aber aggressiven und umstrittenen Fördermethode riesige neue Lagerstätten erschlossen werden. Dieses so genannte „Schiefergas" hat das Potenzial zur Umkehrung aller bisher gültigen Regeln. Die USA sitzen plötzlich auf unvorstellbar großen Energiereserven, die laut Präsident Barack Obama „für Jahrhunderte" reichen. Tatsächlich könnte Amerika, das dank Schiefergas bereits zum weltgrößten Gas-Förderland aufgestiegen ist, künftig zum Exportland für Erdgas werden.

Auch in Europas Böden werden beträchtliche Schiefergas-Vorkommen vermutet, die Vorräte könnten bei heutigem Bedarf für 250 Jahre reichen. Bislang ringt man aber noch um eine Strategie.

Umstritten ist die Fördermethode via „Fracking", wobei eine Chemikalienmischung ins Erdreich gepresst wird. Dies könne das Grundwasser gefährden. Auch die Erdbeben-Gefahr wird diskutiert. Frankreich und Bulgarien haben bereits ein Verbot für die Schiefergasförderung beschlossen, in den meisten anderen Staaten wartet man derzeit ab, bis genauere Forschungsresultate vorliegen. Vor dem Hintergrund der Klimaschutz-Problematik wird aber auch ein gewaltiger Rückschlag für erneuerbare Energien durch billiges Gas befürchtet.

11.2 Eigenschaften und Verarbeitung von Rohöl

(properties of crude oil and its processing)

Abb. 174.1 *Verschiedene Rohölsorten*

Das geförderte Erdöl ist eine Mischung aus Rohöl, Wasser und Sand.

Rohöle bestehen aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen und verwandten Verbindungen (heterocyclische Verbindungen). Je nach Sorte sind sie helle, dünnflüssige bis dunkle, dickflüssige, z. T. zähe Massen **(Abb. 174.1)**. Sie besitzen unterschiedlichen Gehalt an Alkanen, Cycloalkanen und Aromaten. Daneben sind noch kleinere Mengen an stickstoff-, sauerstoff- und schwefelhältigen Verbindungen enthalten.

Die Aufarbeitung der Rohöle erfolgt in **Raffinerien** (*refineries*) mit Hilfe verschiedener Verfahren.

Experiment

Dieses Experiment kannst du mit Hilfe deiner Lehrerin/deines Lehrers selbst durchführen.

Achtung: Versuch im Abzug durchführen und offenes Feuer vermeiden!

Gib ca. 100 ml Rohöl und einige Siedesteinchen in einen Rundkolben, wie in **Abb. 174.2** dargestellt. Erhitze nun mit einem Heizpilz oder Ölbad unter langsamer Steigerung der Temperatur und verfolge die Destillation am Thermometer. Die Destillate tropfen in den Kolben an der Spinne. Durch Drehen der Spinne kann das Destillat in einem neuen Kolben gesammelt werden.

Wechsle die Vorlage jeweils bei einer Temperatur von ca. 60 °C, 140 °C und 220 °C.

Überprüfe die drei Destillate sowie den Rückstand auf Aussehen, Geruch und Viskosität (Zähflüssigkeit). Dokumentiere deine Ergebnisse in kurzen Sätzen!

Kühlwasser

Abb. 174.2 *Destillationsapparatur*

Abb. 174.3 *Destillationsanlage*

Abb. 174.4 *Teil eines Glockenbodens*

1. Primärdestillation *(primary destillation)*

Das gereinigte Rohöl wird auf eine Temperatur von 350 - 400 °C erhitzt, wobei ein Teil verdampft. Dieser wird in Destillationskolonnen **(Abb. 174.3)** eingeleitet. Die Kolonnen sind im Inneren mit Glockenböden in Stockwerke unterteilt **(Abb. 174.4)**. Die Temperatur der Glockenböden nimmt in einer Kolonne nach oben hin ab. Auf den Böden sammeln sich Gemische mit bestimmten Siedebereichen (**Fraktionen**), die ständig abgezogen werden. Diese Art der Destillation nennt man auch **fraktionierte Destillation**[1] (*fractional destillation*).

2. Vakuum-Destillation *(vacuum destillation)*

Über 400 °C würden sich die Bestandteile des Rohöls zersetzen. Daher wird der im ersten Schritt nicht verdampfte Anteil unter vermindertem Druck destilliert. Man erhält wieder einzelne Fraktionen und einen nicht weiter destillierbaren Rückstand **(Abb. 175.1)**.

[1)] Weil die Bestandteile auf den einzelnen Böden kondensieren, spricht man auch von **fraktionierter Kondensation** (*fractional condensation*).

Dünnflüssige Rohöle besitzen einen hohen Anteil von Benzinen, dickflüssige Rohöle einen hohen Anteil von schwerem Heizöl und Schmierölen. Der Gehalt an Benzin und Diesel in den Rohölen ist meist deutlich niedriger als der Verbrauch **(Abb. 175.2)**. Zur Deckung des Bedarfs müssen die Rohölfraktionen weiter bearbeitet werden.

	Nordsee	Venezuela	Nigeria	Lybien	Saudi-Arabien	Verbrauch
Gase	2	1	1	1	2	2
Benzine	21	10	17	22	15	33
Mitteldestillate (Heizöl leicht, Dieselöl)	36	29	45	39	26	47
Rückstand (Heizöl schwer, Schmieröl, Bitumen)	41	60	37	38	57	18

Abb. 175.2 *Vergleich der Zusammensetzung von Rohölen unterschiedlicher Herkunft mit dem durchschnittlichen Verbrauch in Österreich.*

Abb. 175.1 *Schema fraktionierte Destillation von Rohöl*

3. Reinigung *(refining)*

Die einzelnen Fraktionen enthalten immer noch **organische Schwefelverbindungen**. Viele der weiteren Verarbeitungsschritte in einer Raffinerie arbeiten mit Katalysatoren, die durch Schwefel unbrauchbar würden. Um dies zu verhindern, müssen die Schwefelverbindungen entfernt werden. Außerdem würde bei der Verbrennung schwefelhaltiger Produkte Schwefeldioxid und in weiterer Folge Saurer Regen entstehen.

Der Schwefel wird mit Wasserstoff und einem Katalysator in der Hydrofiner-Anlage zu Schwefelwasserstoff umgewandelt. Aus diesem gewinnt man schließlich reinen Schwefel.

4. Cracken[1] *(cracking)*

Beim Cracken werden langkettige Kohlenwasserstoffe, vor allem der Leichtbenzin-Fraktion, in kurzkettige gespalten. Dieser Vorgang kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden:

- **thermisches Cracken** (*thermal cracking*) – Kohlenwasserstoffe werden unter Druck bei ca. 450 – 800°C gespalten. Eines der thermischen Crackverfahren ist das **Steamcracken**. Dabei erfolgt unter Zugabe von Wasserdampf die Spaltung in kurzkettige Alkene (z. B. Ethen, Propen).
- **katalytisches Cracken** (*catalytic cracking*) – Durch die Verwendung eines Katalysators sind geringere Temperaturen und ein geringerer Druck als beim thermischen Cracken erforderlich.

Die beim Cracken anfallenden Produkte werden anschließend wieder durch Destillation getrennt.

Abb. 175.3 *Crackanlage*

Merk & Würdig

Beim **Cracken** werden langkettige Kohlenwasserstoffe in kurzkettige gespalten.

[1] „to crack" (engl.) = „spalten"

Beispiel 11.1

$H_3C{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$

n-Decan

↓ 540°C, Katalysator

$H_3C{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$ + $H_2C{=}CH{-}CH_3$ + $H_2C{=}CH_2$

n-Pentan | Propen | Ethen

Abb. 176.1 *Beim Cracken entstehen auch ungesättigte Kohlenwasserstoffe, die zur Erzeugung von Kunststoffen verwendet werden.*

Merk & Würdig

Beim **Reformieren** werden unverzweigte Kohlenwasserstoffe in verzweigte oder ringförmige umgewandelt.

5. Reformieren *(reforming)*

Unverzweigte Kohlenwasserstoffketten der Benzinfraktion werden in verzweigte oder ringförmige Kohlenwasserstoffe umgewandelt. Dies geschieht meist mit Hilfe von Platin-Katalysatoren.

Beispiel 11.2

Isomerisierung

$H_3C{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3 \longrightarrow H_3C{-}CH(CH_3){-}CH(CH_3){-}CH_2{-}CH_3$

n-Heptan → 2,3-Dimethylpentan

Cyclisierung

$H_3C{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3 \longrightarrow C_5H_8(CH_3)_2 + H_2$

n-Heptan → 1,2-Dimethylcyclopentan

Durch das Reformieren erhalten die Kohlenwasserstoffe bessere Verbrennungseigenschaften.

Die **Oktanzahl** (*octane number*) ist ein Maß für die Klopffestigkeit, d. h. die Verbrennungsqualität von Benzinen. Das Benzindampf-Luft-Gemisch soll im Motor an der Zündkerze explodieren. Bei minderwertigem Benzin erfolgt diese Reaktion aber unkontrolliert. Dies macht sich durch ein Klopfen bemerkbar. Als Folge davon verschlechtert sich die Motorleistung, im schlimmsten Fall kann sogar der Motor beschädigt werden. Die Klopffestigkeit verschiedener Benzinsorten wird mit Mischungen von **iso-Octan**[1] (Oktanzahl 100) und **n-Heptan** (Oktanzahl 0) verglichen. Superbenzin besitzt mindestens 95 Oktan, d. h., er ist ebenso klopffest wie eine Mischung aus 95 % iso-Octan und 5 % n-Heptan. Je höher die Oktanzahl ist, umso bessere Verbrennungseigenschaften besitzt das Benzin.

Abb. 176.2 *Zapfsäule in Frankreich. Angeboten wird neben Diesel auch Benzin mit 95 bzw. 98 Oktan.*

[1] iso-Octan = 2, 3, 4-Trimethylpentan

Verwendung von Rohöl *(how we use oil)*

Erdöl ist weltweit der wichtigste Energieträger.

Etwa 90 % der jährlich geförderten Erdölmenge werden in Form von Heizölen und Kraftstoffen verbrannt, nur etwa 10 % dienen zur Herstellung von Grundstoffen für die chemische Industrie. Dennoch werden heute ca. 90 % aller Chemieprodukte auf der Basis Erdöl hergestellt.

Im Wesentlichen entstehen in einer Raffinerie 6 Gruppen von Grundstoffen für die petrochemische Industrie:

- Gesättigte Kohlenwasserstoffe (z. B. Methan, Ethan, Propan, Butan)
- Ungesättigte Kohlenwasserstoffe (z. B. Ethen, Propen, Butadiene)
- Aromatische Verbindungen (z. B. Benzen, Toluen, Xylen)
- Hochmolekulare Kohlenwasserstoffe (z. B. Paraffinöle)
- Kohlenstoff (z. B. Koks, Ruß)
- Schwefel

Abb. 177.1 *Raffinerie*

Beispiel 11.3

Produkte aus der Leichtbenzinfraktion nach dem Cracken

Leichtbenzin →	cracken →	Ethen →	Polyethen	z. B.: Verpackungsmittel, Folien, Flaschen, Haushaltsartikel
			Ethylenoxid	z. B.: Wasch-, Reinigungsmittel, Lacke, Farbstoffe, Fasern
			Ethanol	z. B.: Lösungsmittel, Lacke, Produkte für Pharmazie
		Propen →	Polypropen	z. B.: Folien, Rohre, Platten, Kfz-Bau, Verpackungen
			Propylenoxid	z. B.: Schaumstoffe für Polstermöbel, Kühlschränke
			Acrylnitril	z. B.: Textilfasern, Kunststoffe, Synthesekautschuk
		C_4-Gemisch →	Butadien	z. B.: Synthesekautschuk für die Herstellung von Autoreifen
Raffinerie →	Petrochemische Industrie →		chemische Industrie	Endprodukte

Abb. 177.2

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du die Bedeutung der fossilen Energieträger für Wirtschaft, Technik, Gesellschaft und Umwelt verstehst und dass du dir Informationen dazu aus verschiedenen Medien beschaffen kannst.

Ü11.1 Betrachte **Abb.173.1** und beantworte folgende Fragen:

a) Aus welchem Erdzeitalter stammen die wichtigsten Vorkommen von Steinkohle bzw. Braunkohle?

b) Vor wie vielen Millionen Jahren sind die wichtigsten Erdölvorkommen entstanden?

Ü11.2 Erdöl besitzt je nach Fundort unterschiedliche Eigenschaften wie z. B. Dichte oder Schwefelgehalt. Nach dem **American Petroleum Institute** wird die Dichte von Erdöl weltweit in **API Grad** angegeben. Der API-Grad ergibt sich aus der Dichte des Rohöls in Bezug auf Wasser. Rohöl mit einem API-Grad größer als 10 schwimmt auf Wasser. Rohöl-Sorten über 31,1°API werden als „leicht“, solche unter 22,3°API als „schwer“ bezeichnet. Leichte Rohöle besitzen einen höheren Anteil an kurzkettigen Kohlenwasserstoffen und eignen sich daher besser für die Gewinnung von Benzin, Diesel, Kerosin u.a. Rohöl-Sorten mit wenig Schwefel werden als „süß“, solche mit einem hohen Schwefelanteil „sauer“ bezeichnet. In nebenstehender Grafik **(Abb. 178.1)** sind einige Erdölsorten dargestellt. Die x-Achse zeigt den Schwefelgehalt in %, die y-Achse den API-Grad. Beantworte daraus folgende Fragen:

a) Schwimmt Arab Light auf Wasser?

b) Welchen durchschnittlichen Schwefel-Gehalt besitzt die Sorte „Maya“, die in Mexiko gefördert wird? Ist es ein süßes oder saures Rohöl?

c) Was könnte die Zahl 17 in der Abkürzung BCF-17 (Rohöl aus Venezuela) bedeuten?

d) Welches Rohöl wird sich besser für die Gewinnung von Benzin eignen: BCF-17 oder Brent Blend (aus der Nordsee)?

Tapis, Brent Blend, WTI Blend, Bonny Light, Arab Light, Daqing, Alaskan North Slope, Dubai, Maya, BCF-7
API - Grad: 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°
Schwefelgehalt: 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0%, 3,5%, 4,0%

Abb. 178.1

Ü11.3 Informiere dich im Internet oder anderen Medien

a) über die jährliche Gewinnung von Erdöl, Erdgas und Kohle sowie ihre geschätzten Weltvorräte.

b) über die Gewinnung von Öl bzw. Gas aus Ölschiefer mit Hilfe von Fracking.

Ü11.4 *A group of compounds collected together during destillation is called* ____________________ .

Ü11.5 *Oil is treaded in barrels. How many litres are one barrel?*

Ü11.6 Eine andere Möglichkeit zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen ist die Hydrierung von Kohle.

a) Wie ist Kohle entstanden?

b) Welche Arten von Kohle gibt es?

c) Informiere dich im Internet oder anderen Medien über die Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus Kohle.

Ü11.7 Suche in verschiedenen Medien nach Pipelines in Österreich und beantworte folgende Fragen: Wie heißen folgende Pipelines, was sind ihre Ausgangs- und Endpunkte: TAL, AWP, TAG?

Ü11.8 Zeichne die Strukturformeln von Ethan, Propan, Ethen, Propen, 1,3-Butadien, Benzen, Methylbenzen (Toluen), 1,2-Dimethylbenzen (Xylen).

12 Derivate

In diesem Kapitel geht es um

- Halogenkohlenwasserstoffe
- Alkohole
- Aldehyde und Ketone
- Carbonsäuren, Hydroxycarbonsäuren
- Carbonsäureester

Abb. 180.1 *Methan und seine Chlor-Derivate: Chlormethan, Dichlormethan, Trichlormethan und Tetrachlormethan*

Merk & Würdig

Halogenkohlenwasserstoffe sind Kohlenwasserstoffe, bei denen wenigstens ein Wasserstoffatom durch ein Halogenatom (F, Cl, Br, I) ersetzt ist.

Abb.180.2 *Chloroform*

Trichlormethan (Chloroform)

Achtung

Chlorethen

Gefahr

Abb.180.3 *Gefahrenhinweise*

Abb. 180.4 *2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-1,4-Dioxin (TCDD)*

Aus den Grundstoffen der petrochemischen Industrie werden durch chemische Reaktionen verschiedenste **Derivate**[1)] hergestellt. Diese unterscheiden sich durch ein typisches Atom oder eine Atomgruppe vom zugrunde liegenden Stamm-Kohlenwasserstoff (**funktionelle Gruppe** – **Band 2, Seite 160**).

12.1 Halogenkohlenwasserstoffe *(halocarbons)*

Halogenkohlenwasserstoffe sind Kohlenwasserstoffe, bei denen mindestens ein Wasserstoffatom durch ein Halogenatom (Fluor, Chlor, Brom, Iod) ersetzt ist.

Gewinnung und Eigenschaften der Halogenkohlenwasserstoffe

(production and properties of halocarbons)

Halogenkohlenwasserstoffe entstehen durch verschiedene Verfahren, z. B. durch Additions- oder Substitutionsreaktion aus Kohlenwasserstoffen **(Band 2, Seite 151 und 153)**.

Sie sind

- **farblose Substanzen** mit relativ niedrigen Siedepunkten,
- kaum mischbar mit Wasser (**hydrophob**),
- gute Lösungsmittel für Fette (**lipophil**),
- meist **giftig**, häufig krebserregend.

Verwendung der Halogenkohlenwasserstoffe *(uses of halocarbons)*

Halogenkohlenwasserstoffe finden hauptsächlich Verwendung als:

- **Lösungsmittel**, z. B. Dichlormethan – CH_2Cl_2, Trichlormethan (Chloroform) $CHCl_3$, Tetrachlorethen (Perchlorethylen) – C_2Cl_4 zur Textilreinigung.
- **Rohstoffe** in der Synthesechemie, z. B. Chlorethen (Vinylchlorid) als Ausgangsmaterial für die Herstellung des Kunststoffs Polyvinylchlorid (PVC).

Gefahren für die Umwelt durch Halogenkohlenwasserstoffe

(environmental hazards by halocarbons)

- Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe – **FCKW** (z. B. Treibgase für Spraydosen, Kältemittel) zerstören die Ozonschicht und sind daher heute in den meisten Ländern verboten.
- **Chloralkane** (mit ca. 10 bis 21 Kohlenstoffatomen) werden als Weichmacher in Kunststoffen verwendet. Sie sammeln sich in der Umwelt an und gelangen schließlich in die Nahrungskette. Chloralkane stehen im Verdacht, krebserregend zu sein.
- Hochgiftige und krebserregende *Dioxine* (z. B. TCDD) entstehen als Nebenprodukte bei der Herstellung verschiedener chlorhaltiger Produkte. Ebenso entstehen sie bei der Verbrennung chlororganischer Substanzen (z. B. PVC in Müllverbrennungsanlagen).
- Viele schon seit Jahren verbotene Chlorkohlenwasserstoffe sind heute immer noch in der Umwelt vorhanden!

Thema & Gesellschaft

Das lange Leid durch Agent Orange

Die hochgiftige Substanz zeigt noch heute ihre Folgen

Hanoi/Washington – Für die US-Armee hätte es ein Wundermittel im Kampf gegen die Kommunisten werden sollen: der großflächige Einsatz des dioxinhältigen Entlaubungsmittels Agent Orange. Noch heute werden in dem südostasiatischen Staat schwerstbehinderte Kinder geboren. Am 10. August jährt sich der erstmalige Einsatz zum 50. Mal, seit 2009 ist das Datum in Vietnam ein Gedenktag.

Fast fünf Millionen Menschen sollen mit der Chemikalie in Berührung gekommen sein. Bis heute wird sie für Missbildungen und Krebserkrankungen verantwortlich gemacht. Ein Problem ist der langsame Abbau des Giftes im Boden, es ist noch immer im Nahrungskreislauf nachweisbar.

Mit dem Einsatz von Agent Orange verfolgten die USA mehrere Ziele. Einerseits sollten durch das Versprühen des Gifts aus Flugzeugen und Hubschraubern über den dichten Dschungeln des Landes Nachschubwege der Nordvietnamesen enttarnt werden. Aber auch zur Anlage eigener Flugplätze und Stützpunkte wurde das Mittel verwendet.

[1)] „derivare" (lat.) = „ableiten"

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du einen Zusammenhang herstellen kannst zwischen der Struktur und den chemischen Eigenschaften der Halogenkohlenwasserstoffe

Ü12.1 Was ist die für die Halogenkohlenwasserstoffe typische „funktionelle Gruppe"?

Ü12.2 Zeichne die Strukturformeln von Chlorethen (Vinylchlorid) und Tetrachlorethen.

Ü12.3 Chlorethen kann z. B. nach folgender Reaktionsgleichung gewonnen werden:

a) Benenne die einzelnen Verbindungen

b) Um welchen Reaktionstyp handelt es sich dabei?

$$HC{\equiv}CH + HCl \longrightarrow H(Cl)C{=}CH_2$$

Abb. 181.1

Ü12.4 *Methane reacts with chlorine in a substitution reaction.*

a) *Draw the structural formula for each compound that can form, as the reaction proceeds.*

b) *What are the IUPAC-names for the compounds in **a)**?*

12.2 Alkohole *(alcohols)*

Alkohole sind Verbindungen eines Kohlenwasserstoffrestes (R) mit einer oder mehreren Hydroxylgruppen (OH-Gruppen).

Verbindungen, bei denen die OH-Gruppe(n) direkt an einen aromatischen Ring gebunden ist (sind), nennt man **Phenole**. Sie sind keine Alkohole **(Abb. 181.2)**.

Merk & Würdig

Alkohole sind Verbindungen eines Kohlenwasserstoffrestes mit einer oder mehreren Hydroxylgruppen.

R-OH

Abb.181.2 *einfachstes Phenol*

Nomenklatur der Alkohole *(nomenclature of alcohols)*

- Der Name des Alkohols ergibt sich aus dem Namen des ***Stammkohlenwasserstoffs*** und der Endung **-ol**. Z. B. Ethanol.
- Die Stellung der OH-Gruppe(n) wird durch Zahlen vor der Endung angegeben: z. B. Propan-2-ol.
- Sind mehrere OH-Gruppen im Molekül vorhanden, verwendet man die Zahlworte **di**, **tri**, usw.: z. B. Propan-1,2,3-triol.

H_3C-CH_2-OH Ethanol

$H_3C-CH(OH)-CH_3$ Propan-2-ol

$H_2C(OH)-CH(OH)-CH_2(OH)$ Propan-1,2,3-triol

Abb. 181.6

Abb.181.3 *Ethanol*

Abb. 181.4 *Butan-1,2,3-triol*

Abb. 181.5 *Butan-2-ol*

Einteilung der Alkohole *(classification of alcohols)*

- Je nach **Anzahl der OH-Gruppen** unterscheidet man einwertige und mehrwertige Alkohole. Ethanol, Butan-1-ol sind einwertige Alkohole, Butan-1,2,3-triol ist ein dreiwertiger Alkohol.

einwertig	mehrwertig	
	zweiwertig	dreiwertig
$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-OH$	$H_3C-CH_2-CH(OH)-CH_2-OH$	$H_3C-CH(OH)-CH(OH)-CH_2-OH$
Butan-1-ol	Butan-1,2-diol	Butan-1,2,3-triol

Merk & Würdig

Das C-Atom, das die OH-Gruppe trägt, ist bei

- **primären Alkoholen** mit höchstens einem C-Atom direkt verbunden,
- **sekundären Alkoholen** mit genau zwei weiteren C-Atomen direkt verbunden,
- **tertiären Alkoholen** mit drei weiteren C-Atomen direkt verbunden.

Abb. 182.1 *Siedepunkt der Alkanole im Vergleich zu den Alkanen in Abhängigkeit von der Anzahl der C-Atome*

Abb. 182.2 *Aufbau eines Alkohol-Moleküls*

Abb. 182.3 *Inosit*

ZUTATEN: SORBIT; MALTIT, KAUMASSE, FEUCHTHALTEMITTEL, GLYCERIN, VERDICKUNGSMITTEL, GUMMI ARABICUM, AROMEN, SÄUERUNGSMITTEL, ÄPFELSÄURE, MANNIT, SÜSSSTOFF E171, EMULGATOR SOJALECITHIN, ÜBERZUGSMITTEL CARNAUBA-WACHS, ANTIOXIDATIONS-MITTEL BHA

Abb. 182.4 *Aufschrift auf einer Kaugummi-Packung:*

- Nach der **Stellung der OH-Gruppe** unterscheidet man primäre, sekundäre und tertiäre Alkohole.

primär	sekundär	tertiär
C—C(H)(H)—OH	C—C(C)(C)—OH	C—C(C)(H)—OH

Entsprechend der Anzahl und der Stellung der OH-Gruppen besitzen die Alkohole unterschiedliche Eigenschaften.

Eigenschaften der Alkohole *(properties of alkohols)*

- **Siedepunkte**
  Alkanole[1] besitzen höhere Siedepunkte als die entsprechenden Alkane. Die Ursache dafür sind Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wasserstoff-Atomen und den Sauerstoff-Atomen benachbarter Moleküle.

Experiment

Dieses Experiment kannst du selbst durchführen.

Stelle 7 Reagenzgläser in einen Reagenzglasständer und beschrifte sie mit den Zahlen 1 bis 7. Fülle in die ersten 6 Reagenzgläser je 3 ml Wasser und in das letzte Reagenzglas 3 ml n-Hexan.

Nun gibst du in die Gläser 1 bis 5 der Reihe nach je 3 ml folgender Alkohole: Methanol, Ethanol, Propan-1-ol, Butan-1-ol und Pentan-1-ol. In das 6. und 7. Glas gibst du je eine Spatelspitze eines festen Alkohols (z. B. Dodecanol).

Schüttle alle 7 Reagenzgläser und beobachte.

Welche Alkohole mischen sich mit Wasser?
Wie verhält sich ein langkettiger Alkohol in einem organischen Lösungsmittel?

Notiere deine Beobachtungen.

- **Mischbarkeit mit Wasser**

Jedes Alkoholmolekül besteht aus zwei unterschiedlichen Teilen: einem hydrophoben Kohlenwasserstoffrest und einer hydrophilen Hydroxylgruppe **(Abb. 182.2)**.

Kurzkettige Alkohole sind mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar. Mit zunehmender Kettenlänge überwiegt der hydrophobe Anteil. Der Alkohol mischt sich immer schlechter in Wasser und leichter in einem organischen Lösungsmittel.

Umgekehrt nimmt die Löslichkeit eines Alkohols in Wasser mit zunehmender Anzahl der OH-Gruppen wieder zu.

- **Süßer Geschmack**
  Propan-1,2,3-triol (**Glycerin**)[2] ist eine farblose, ölige Flüssigkeit mit einem süßlichen Geschmack. Fünf- oder sechswertige Alkohole (z. B. Inosit, Sorbit, Xylit) werden auch als „**Zuckeralkohole**" bezeichnet. Diese und höherwertige Alkohole (z. B. der 9-wertige Maltit) sind in der Lebensmittelindustrie als **Zuckeraustauschstoffe** von Bedeutung.

[1] Alkanole sind Alkohole, die sich von Alkanen ableiten (Methanol, Ethanol usw.)
[2] „glycis" (griech.)=„süß"

Ergänzung & Ausblick

Der Gehalt des Blutzuckers (Traubenzucker, Glucose) beträgt im Normalfall 720 bis 900 mg/l Blut. Der Zucker ist für die Ernährung der einzelnen Gewebe von großer Bedeutung und muss daher konstant gehalten werden. Eine Regulierung über die Zuckeraufnahme mit der Nahrung ist praktisch nicht möglich. Deshalb werden im Organismus Zuckerreserven in Form von **Stärke** (in Pflanzen) oder **Glycogen** (bei Mensch und Tier) angelegt. Der Abbau bzw. Neuaufbau der Reserven ist durch Hormone gesteuert. Besonders wichtig ist die Wirkung von **Insulin**, einem von der Bauchspeicheldrüse gebildeten Hormon, das den Blutzuckergehalt senkt. Bei der **Zuckerkrankheit (Diabetes)** führt ein Insulinmangel zu einem überhöhten Blutzuckerspiegel. Diabetiker müssen daher Produkte wie Rohr- bzw. Rübenzucker oder Stärke meiden, weil daraus Glucose freigesetzt wird. Dies lässt sich bei der Aufnahme von Zuckeralkoholen vermeiden.

In der Mundhöhle vorkommende Bakterien bauen Zuckermoleküle ab und bilden dabei Säuren, die die Zähne zerstören. Als Bestandteil von Süßigkeiten, wie Bonbons und Kaugummis, sollen Zuckeralkohole helfen, die Karies zu reduzieren.

Schließlich sollen Zuckeralkohole auch den Energiegehalt von Lebensmitteln im Vergleich zu zuckerhaltigen senken. Bestes Beispiel sind die sogenannten Light-Produkte. Bei Getränken wird der Zucker häufig durch eine Kombination von Süßstoffen und Fruchtzucker ersetzt. Je nach Anteil der Inhaltsstoffe sind diese Getränke weniger energiehaltig als zuckerhaltige Limonaden. Zuckerfrei ist aber nicht gleichbedeutend mit energiefrei!

Einige Alkohole, ihre Eigenschaften und Verwendungen

(some alcohols, their properties and uses)

Alkohol	Eigenschaften	Verwendung
Methanol (*methanol*) CH_3OH	Farblose Flüssigkeit, Siedepunkt 65 °C, brennbar, giftig, führt in geringer Menge zur Erblindung, ab ca. 25 g zum Tod.	Lösungsmittel, Grundstoff für weitere Synthesen
Ethanol (*ethanol*) C_2H_5OH	Farblose Flüssigkeit, Siedepunkt 78 °C, brennbar, wirkt berauschend	Herstellung alkoholischer Getränke **(Seite 250)**, Lösungsmittel (z. B. für Parfums), Herstellung von Estern **(Seite 190)**, Zusatz zu Benzin
Ethylenglycol (*ethylene glycol*) (Ethan-1,2-diol)	Farblose, ölige Flüssigkeit; Mischungen mit Wasser gefrieren erst unter 0 °C (z. B. Ethylenglycol : Wasser = 1 : 1 bei –40 °C)	Frostschutzmittel für Motoren (Glysantin®)
Glycerin (*glycerine*)	Farblose, ölige Flüssigkeit, mit Wasser mischbar, leicht süßer Geschmack	Zur Feuchthaltung in Lebensmitteln und Kosmetika, Herstellung von Glyceroltrinitrat („Nitroglycerin") und in weiterer Folge Dynamit.
Mehrwertige Alkohole	Farblose Festkörper, süßer Geschmack	Zuckeraustauschstoffe in der Lebensmittelindustrie

Tab. 183.1

Thema & Gesellschaft

Wie Giftschnaps zum Killer wird

Pansch-Skandal. In Tschechien sind schon mindestens 17 Menschen an hochgiftigem Wodka oder Rum gestorben. Der Zoll warnt vor Kauf aus unbekannten Quellen.

Mit Freunden feierte Tomas zünftig seinen 34. Geburtstag. Eine kleine Flasche Wodka gehörte dazu. Seit Dienstag liegt der Tscheche auf der Intensivstation des Krankenhauses in Opava, er ist teilweise erblindet. „Es ist wie ein Nebel", sagte Tomas örtlichen Medien. Seine Kollegen hatten die Flasche in einem kleinen Geschäft gekauft. Doch die vermeintliche Markenware war ein extrem giftiger Methanolcocktail.

Und das ist längst kein Einzelfall mehr. Als Gegengift geben die Ärzte Dutzenden Patienten in Tschechien reines Ethanol. Es soll den Stoffwechsel im Körper blockieren und die gefährliche Umwandlung des Methanols zu ätzender Ameisensäure verhindern. Viele Opfer des Pansch-Skandals halten Schwindel, Kopfschmerzen, Sehstörungen und Übelkeit noch für Zeichen eines gewöhnlichen Katers. Sie kommen zu spät in die Klinik, erblinden oder sterben an Atemlähmung. Die Zahl der Toten stieg in einer Woche auf mindestens 17.

Der Schwarzmarktfusel wird nicht mehr gebrannt, sondern wie im Chemielabor gemischt. Nun müsse es bei der illegalen Produktion zu einem fatalen Fehler gekommen sein, sagte Melzoch. „Jemand hat ein Fass vertauscht." Statt Trinkalkohols landete das gefährliche Methanol im selbst gemischten Pseudowodka. Nur so sei die enorme Giftdosis in den Getränken überhaupt zu erklären. Bei einem Patienten wurden nach Angaben von Ärzten im Blut sieben Promille reinen Methanols gemessen.

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du deine Kenntnisse über die Struktur, Benennung und Eigenschaften von Alkoholen überprüfen.

Ü12.5 Welche der folgenden Verbindungen ist ein Alkohol?

☐ ☐ NaOH ☐ ☐ ☐ ☐

Ü12.6 **a)** Benenne die Alkohole von Ü12.5.

b) Gib die Strukturformeln an von: Propan-2-ol, Hexan-2,3-diol, Cyclopentanol

Ü12.7 Welche der folgenden Alkohole sind einwertig, welche mehrwertig?

☐ Butan-1-ol ☐ Ethan-1,2-diol ☐ Glycerin ☐ Ethanol

Ü12.8 Welche der folgenden Alkohole sind, primär, sekundär bzw. tertiär?

a) $H_3C—OH$

________ ________ ________ ________

b) 2-Methylpropan-2-ol | Propan-2-ol | Propan-1-ol | Ethanol

________ ________ ________ ________

Ü12.9 Die Löslichkeit der Alkohole in Wasser ist abhängig von ihrer Kettenlänge und der Anzahl der OH-Gruppen. Wird sich der neunwertige Alkohol Maltit in Wasser lösen? Begründe deine Antwort!

12.3 Aldehyde und Ketone *(aldehydes and ketones)*

Experiment

Dieses Experiment kannst du unter Aufsicht deines Lehrers/deiner Lehrerin selbst durchführen.

Fülle in drei 250 ml Bechergläser je ca. 1 cm hoch folgende Alkohole:

1) Propan-1-ol,
2) Propan-2-ol,
3) 2-Methylpropan-2-ol.

Erhitze einen etwa 10 cm langen Kupferstreifen in der rauschenden Flamme des Bunsenbrenners. Tauche dann den noch heißen Streifen in das erste der drei Bechergläser mit Propan-1-ol. Führe dieses Experiment auch mit den beiden anderen Alkoholen durch.

Notiere deine Beobachtungen in kurzen Sätzen.

Abb. 184.1 *Oxidation eines Alkohols mit CuO*

Beim Erhitzen in der Flamme wird Kupfer zu schwarzem Kupferoxid oxidiert. Durch einen primären oder sekundären Alkohol wird Kupferoxid wieder zu elementarem Kupfer reduziert. Ein tertiärer Alkohol gibt keine Reaktion.

Reduktion von primären und sekundären Alkoholen
(reduction of primary and secondary alcohols)

$$R/H—CH(R/H)—OH + CuO \longrightarrow (R/H)_2C{=}O + H_2O + Cu$$

Abb.184.2 *Reaktionsschema für die Reduktion von primären oder sekundären Alkoholen*

Bei der Oxidation entsteht eine neue funktionelle Gruppe, die **Carbonylgruppe**. Die Stoffgruppe nennt man daher Carbonylverbindungen. Man unterscheidet **Aldehyde**[1] und **Ketone**.

Alkohol	Strukturformel	Oxidationsprodukt	
primär	H–C(H)(OH)–(H)R	(H)R–C(H)=O	Aldehyd
sekundär	R–C(H)(OH)–R	R–C(R)=O	Keton

Tab. 185.1

Merk & Würdig

Aldehyde entstehen durch Oxidation von primären Alkoholen. Ihre funktionelle Gruppe ist die **Aldehydgruppe**.

R-CHO

Ketone entstehen durch Oxidation von sekundären Alkoholen. Ihre funktionelle Gruppe ist die **Ketogruppe**.

R-CO-R

Nomenklatur der Aldehyde und Ketone *(nomenclature of aldehydes and ketones)*

- Der Name des **Aldehyds** ergibt sich aus dem Namen des **Stammkohlenwasserstoffs** und der Endung **-al** (z. B. Ethanal).
- Der Name des **Ketons** ergibt sich aus dem Namen des **Stammkohlenwasserstoffs** und der Endung **-on**. (z. B. Propanon).
  Die Lage der Carbonylgruppe wird durch eine Stellungsziffer vor der Endung angegeben, z. B.: Butan-2-on.

Merk & Würdig

Aldehyde benennt man durch Anhängen der Endung **-al** an den Namen des Kohlenwasserstoffs.

Ketone benennt man durch Anhängen der Endung **-on** an den Namen des Kohlenwasserstoffs.

Beispiel 12.1

Formuliere die Reaktionsgleichungen für die Oxidation von Propan-1-ol und Propan-2-ol mit heißem Kupferoxid:

$H_3C-CH_2-CH_2-OH + CuO \longrightarrow H_3C-CH_2-CHO + H_2O + Cu$

Propan-1-ol → Propanal

Abb. 185.1 *Propanal*

$(H_3C)_2CH-OH + CuO \longrightarrow (H_3C)_2C=O + H_2O + Cu$

Propan-2-ol → Propanon

Abb. 185.2 *Propanon*

Einige Aldehyde und Ketone, ihre Eigenschaften und Verwendungen

(some aldehydes and ketones, their properties and uses)

Alkohol	Eigenschaften	Verwendung
Methanal (Formaldehyd) *methanal* HCHO	Farbloses Gas, stechender Geruch, giftig, leicht löslich in Wasser. Die wässrige Lösung (Formalin) wirkt konservierend.	Wichtiger Rohstoff der chemischen Industrie (z. B. Herstellung von Kunstharzen), Konservierungsmittel für biologische Präparate **(Abb. 185.3)**
Propanon (Aceton) *propanone* CH_3-CO-CH_3	Farblose, brennbare Flüssigkeit, mit Wasser mischbar, gutes Lösungsmittel für Farben und Lacke	Lösungsmittel (z. B. für Nagellackentferner

Tab. 185.2

Abb.185.3 *Flüssigpräparat mit Formalin*

[1] Von „**al**coholus **dehyd**rogenatus" (lat.) = „Alkohol, dem Wasser entzogen wurde"

Ergänzung & Ausblick

Viele Aldehyde und Ketone sind Bestandteile von Parfums und Aromastoffen für die Lebensmittelindustrie.

Langkettige Aldehyde mit 9 bis 14 Kohlenstoffatomen besitzen z. B. fruchtartige Gerüche nach Orangenschalen, Fichtennadeln oder Kokos. Eine Mischung aus Decanal (C_{10}), Undecanal (C_{11}) und Dodecanal (C_{12}) bildet die Duftnote des Parfums Chanel No.5 **(Abb. 186.1)**. Andere Beispiele für Aldehyde als Aromastoffe sind **Vanillin**, **Benzaldehyd** **(Abb.186.2)** und **Zimtaldehyd** **(Abb. 186.3)**. Benzaldehyd ist der Bestandteil von Bittermandelöl.

Ketone findet man in der Natur häufig als Brunftsekrete von Tieren (z. B. Moschus, Zibet). Sie sind in geringer Menge in vielen Parfums enthalten und bilden die Grundnote des Parfums. Heute werden diese Substanzen künstlich hergestellt. Das ringförmige Keton **Muscon** z. B. ist der wichtigste Duftstoff im Moschus, einem Sekret des Moschushirsches **(Abb. 186.4)**.

Abb.186.1

Abb.186.2 *Benzaldehyd*

Abb.186.3 *Zimtaldehyd*

Abb.186.4 *Muscon*

Experiment

Dieses Experiment kannst du unter Aufsicht deines Lehrers/deiner Lehrerin selber durchführen.

Nachweis von Aldehyden durch die Tollensprobe (Silberspiegelprobe)

Gib in ein sauberes Reagenzglas etwa 5 ml einer 0,1molaren Silbernitratlösung. Nun tropfe so lange etwa 10%ige Ammoniaklösung zu, bis sich der gebildete Niederschlag gerade wieder auflöst. Gib nun einige Tropfen eines Aldehyds (z. B. Ethanal) zu und schüttle. Die Mischung erwärmst du einige Minuten im Wasserbad bei 70 °C.

Beschreibe deine Beobachtungen in kurzen Sätzen.

Abb.186.5 *verspiegeltes Reagenzglas*

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du dein Wissen über Alkohole, Aldehyde und Ketone anwenden.

Ü12.10 Formuliere die Reaktionsgleichung für die Oxidation von Kupfer zu Kupferoxid.

Ü12.11 Welche Aldehyde/Ketone entstehen bei der Oxidation folgender Alkohole? Gib ihre Summenformeln und Strukturformeln sowie ihre Namen an:

a) Ethanol **b)** Butan-1-ol **c)** Butan-2-ol

Ü12.12 Ordne die folgenden Verbindungen den Stoffklassen Alkohol, Aldehyd bzw. Keton zu:

__________ __________ __________ __________

Ü12.13 Bei der Tollensprobe entsteht mit Hilfe eines Aldehyds aus Silbernitrat ($AgNO_3$) elementares Silber.
Silber-Ionen (Ag^+)werden dabei zu elementarem __________ (reduziert/oxidiert).
Daher wurde das Aldehyd __________ (reduziert/oxidiert).

12.4 Carbonsäuren *(carboxylic acids)*

Im **Experiment auf Seite 186** wurden Silber-Ionen zu elementarem Silber reduziert. Das Aldehyd wurde gleichzeitig zu einer **Carbonsäure** oxidiert:

$$R-CHO \xrightarrow{\text{Oxidation}} R-COOH$$

Abb.187.1 *Oxidation eines Aldehyds zur Carbonsäure*

Die funktionelle Gruppe von Carbonsäuren ist die **Carboxylgruppe**[1) – COOH.

Merk & Würdig

Carbonsäuren sind Verbindungen eines organischen Restes mit einer oder mehreren Carboxylgruppen

R – COOH

Eigenschaften von Carbonsäuren *(properties of carboxylic acids)*

- Carbonsäuren entstehen durch Oxidation der entsprechenden Alkohole bzw. Aldehyde.
- Sie sind **farblose Flüssigkeiten** oder **Festkörper**.
- Kurzkettige Carbonsäuren besitzen einen intensiven Geruch.
- Mit zunehmender Anzahl von Kohlenstoff-Atomen sinkt die Löslichkeit in Wasser.
- Die Carboxylgruppe spaltet ein Proton ab. Dabei entsteht ein **Carboxylat-Anion**.
- Carbonsäuren bilden daher Salze.
- Carbonsäuren reagieren mit Alkoholen zu **Carbonsäureestern** (siehe **Experiment auf Seite 190**).

$$R-COOH \longrightarrow R-COO^- + H^+$$

Abb. 187.2 *Bildung des Carboxylat-Anions*

Experiment

Prüfe vorsichtig den Geruch der ersten fünf Glieder der homologen Reihe der Alkansäuren:
Methansäure, Ethansäure, Propansäure, Butansäure und Pentansäure.

Wie ändern sich die Gerüche in der Reihenfolge?
Dokumentiere deine Beobachtungen.

Abb. 187.3

Einige Carbonsäuren, ihre Eigenschaften und Verwendungen *(some carboxylic acids, their properties and uses)*

Carbonsäure	Vorkommen, Eigenschaften	Verwendung
Methansäure (Ameisensäure) *methanoic acid* H-COOH	Sekret von Ameisen und Brennnesseln. Farblose, stechend riechende, ätzende Flüssigkeit, verursacht Brennen und Juckreiz auf der Haut	Rohstoff in der organischen Chemie, Wirkstoff vieler Entkalkungsmittel
Ethansäure (Essigsäure) *ethanoic acid* CH_3COOH	Farblose, stechend riechende, ätzende Flüssigkeit; Salze = Acetate	Herstellung von Speiseessig **(Seite 253)**, Arzneimitteln (z. B. Aspirin®), Aromastoffen und Lösungsmitteln
Langkettige Carbonsäuren (**Fettsäuren** – *fatty acids*) z. B. Ölsäure, Palmitinsäure, Stearinsäure:	Bestandteile von Fetten und Wachsen **(Seite 191)** Farblose Festkörper, unlöslich in Wasser.	Herstellung von Seife **(Seite 193)**

H_3C ... OH, O (Skelettformel einer Fettsäure)

Tab. 187.1

1) „Carboxyl“ von Carbonyl und Hydroxyl

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du dein Wissen über Alkohole, Carbonylverbindungen und Carbonsäuren anwenden. Außerdem zeigst du, dass du chemische Verbindungen aufgrund ihrer Struktur den genannten Substanzklassen zuordnen kannst.

Ü12.14 Welche Carbonsäure entsteht bei der Oxidation von Propanal? Gib den Namen an und zeichne die Strukturformel.

Ü12.15 Vervollständige folgendes Schema:

Alkohol					
	primär	Oxidation →		Oxidation →	
	sekundär	Oxidation →			
	tertiär				

Ü12.16 Ordne folgende Verbindungen den Substanzklassen Alkohol, Aldehyd, Keton oder Carbonsäure zu:

Ü12.17 Beim Ranzigwerden von Fetten werden langkettige Carbonsäuren (Fettsäuren) in kurzkettige gespalten. Dabei entsteht z. B. die Butansäure (Buttersäure). Gib ihre Struktur- und Summenformel an.

Ü12.18 Alkansäuren sind Carbonsäuren, die sich von Alkanen ableiten. Die allgemeine Summenformel der Alkane ist C_nH_{2n+2}. Was ist daher die allgemeine Summenformel der Alkansäuren?

Ü12.19 *What are the first five members of the homologous series of the alcanoic acids? Give their names and draw their structures.*

Ü12.20 Zeichne die Strukturformel des Acetat-Anions. Welche Formel hat daher das Salz Natriumacetat?

Hydroxycarbonsäuren

Hydroxycarbonsäuren sind Carbonsäuren, die im Molekül noch zusätzlich eine oder mehrere **Hydroxyl-Gruppen** (OH-Gruppen) tragen.

Ergänzung & Ausblick

Viele Hydroxycarbonsäuren sind Naturstoffe, z. B. Milchsäure, Äpfelsäure, Citronensäure oder Weinsäure. Einige von ihnen sind wichtige Inhaltsstoffe von Früchten. Sie werden daher auch als **Fruchtsäuren** bezeichnet und tragen zusammen mit Zuckern und Aromastoffen zum Geschmack der Früchte bei.

Abb. 188.1 ***Milchsäure*** *(lactic acid)*

Abb. 188.2 ***Weinsäure*** *(tartaric acid)*

Abb.188.3 ***Citronensäure*** *(citric acid)*

Äpfelsäure und Citronensäure sind auch wichtige Zwischenprodukte beim Stoffwechsel aller Zellen. Der **Citronensäure-Cyclus** ist einer von mehreren Stoffkreisläufen. Dabei werden die Nährstoffe (Eiweiß, Fette, Kohlenhydrate) zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut. Die Zelle gewinnt dabei die zum Leben notwendige Energie. Überschüssig vorhandene Nährstoffe werden in Form von Glycogen oder Fett gespeichert **(Seite 240)**.

Thema & Gesellschaft

Google Doodle ehrt Vitamin-C-Entdecker

Ungarischer Mediziner Albert Szent-Györgyi spaltete erstmals Ascorbinsäure

Google widmet dem ungarischen Mediziner und Biochemiker Albert Szent-Györgyi, eigentlich Albert Szent-Györgyi Nagyrápolt, ein fruchtiges Doodle. Am Freitag wäre er 118 Jahre alt geworden. „Für seine Entdeckungen auf dem Gebiet der biologischen Verbrennungsprozesse, besonders in Beziehung auf das Vitamin C und die Katalyse der Fumarsäure" erhielt er 1937 den Nobelpreis für Medizin.

Abb. 189.1 *Ascorbinsäure*

Die Geschichte von Ascorbinsäure und Vitamin C geht auf die Bemühungen von mehreren Wissenschaftlern zurück. Im Jahr 1754 entdeckte der britische Schiffsarzt James Lind die Wirksamkeit von Zitrusfrüchten gegen „Skorbut". Die heimtückische Krankheit mit Symptomen wie Fieber und Erschöpfung war bis ins 18. Jahrhundert die häufigste Todesursache auf Seereisen. Als Mangelerkrankung wurde Skorbut später erst von zwei norwegischen Ärzten entlarvt, bis 1921 der Biochemiker Sylvester Zilva erstmals den Namen Vitamin C verwendete. Forschungen von Albert Szent-Györgyi lieferten schließlich den Durchbruch. Ihm gelang es, durch Kristallisationsversuche die für die Skorbut-Heilung verantwortliche Substanz zu isolieren: einen farb- und geruchneutralen Stoff mit saurem Geschmack – das Vitamin C.

Thema & Gesellschaft

K.-o.-Tropfen-Delikte in Österreich stark gestiegen

84 Strafanzeigen im Jahr 2011, SPÖ-Sprecher Maier vermutet viel höhere Dunkelziffer

Wien – SPÖ-Konsumentenschutzsprecher Johann Maier warnte in einer Aussendung vom Donnerstag vor der wachsenden Gefahr von K.-o.-Tropfen. „Im Jahr 2010 gab es 62 angezeigte Straftaten bezüglich Sexual- oder Eigentumsdelikten im Zusammenhang mit K.-o.-Tropfen. 2011 waren es bereits 84", sagte Maier. Allein in Wien wurden laut den Angaben 39 Personen nach Betäubung ausgeraubt. 28 in der Mehrzahl weibliche Personen wurden vergewaltigt.

„Die Dunkelziffer ist wahrscheinlich ungleich höher, da es für die Opfer oft schwer nachzuweisen ist, dass sie mit K.-o.-Tropfen betäubt wurden", so Maier. Aus einer aktuellen Anfragebeantwortung durch Innenministerin Johanna Mikl-Leitner (ÖVP) geht hervor, welche Substanzen vornehmlich verwendet und unter welchem Verkaufsnamen sie gehandelt werden: „Liquid Ecstasy", „Gamma" „Liquid X", „G", „Bottle", „Soap" oder „Fantasy", die jeweils oft GHB (Gamma-Hydroxybuttersäure) und Butandiol (BDO) enthalten.

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du dir Informationen über chemische Substanzen aus verschiedenen Medien beschaffen kannst. Du beweist auch, dass du deine Kenntnisse über Säurereste und Salze auf organische Säuren anwenden kannst.

Ü12.21 Beantworte folgende Fragen mit Hilfe des Internets oder anderer Medien:

a) Was ist der tägliche Bedarf eines Erwachsenen an Vitamin C?

b) In welchen einheimischen Obst- oder Gemüsesorten ist der Gehalt an Vitamin C besonders hoch?

c) Was sind die Folgen von Vitamin C-Mangel?

Ü12.22 Je länger Weintrauben reifen, desto größer ist der Gehalt an Weinsäure. Während der längeren Reifezeit können sie auch mehr Mineralien aus dem Boden aufnehmen. Die Weinsäure bildet mit Kalium- oder Calcium-Ionen Salze (Kaliumtartrat, Kaliumhydrogentartrat bzw. Calciumtartrat). Dieser sogenannte „Weinstein" ist im Wein nicht löslich und kristallisiert aus – an der Flaschenwand, am Boden, am Korken oder bereits im Fass (Abb. 189.2). Weinstein hat keinen Einfluss auf die Qualität eines Weins und kann leicht abgetrennt werden.

Zeichne die Strukturformeln der beiden Säurereste der Weinsäure, von Hydrogentartrat und Tartrat.

Abb. 189.2 *Weinstein im Fass*

Ü12.23 Lies den Zeitungsartikel über K.o.-Tropfen. Bei der Substanz GHB handelt es sich um 4-Hydroxybutansäure, bei der Substanz BDO um Butan-1,4-diol. Zeichne die Strukturformeln beider Verbindungen.

Ü12.24 *What ist he main chemical component in vinegar?*

***a)** formic acid* ***b)** lactic acid* ***c)** acetic acid* ***d)** citric acid*

12.5 Carbonsäureester *(carboxylate ester)*

Experiment

Dieses Experiment kannst du unter Aufsicht deines Lehrers/deiner Lehrerin selber durchführen.

Vorsicht! Alkoholdämpfe sind brennbar!

Gib in ein Reagenzglas etwa 3 ml konzentrierte Essigsäure und 3 ml Pentan-1-ol. Rieche an der Mischung. Nach Zusatz von einer Spatelspitze Zinkchlorid (wasserfrei) erhitze die Mischung im siedenden Wasserbad für etwa 10 Minuten. Lass dann das Reagenzglas abkühlen und rieche wieder.

Beschreibe deine Beobachtungen in kurzen Sätzen.

Merk & Würdig

Carbonsäureester sind Verbindungen einer Carbonsäure mit einem Alkohol. Ihre funktionellen Gruppe ist

$$R-C(=O)-O-R$$

Mit Hilfe eines wasserentziehenden Mittels (z. B. Zinkchlorid, Schwefelsäure) reagiert eine Carbonsäure mit einem Alkohol zu einem Carbonsäureester. Dabei wird Wasser abgespalten. Eine solche Reaktion nennt man **Kondensationsreaktion**.

$$R-C(=O)-OH + H-O-R' \rightleftharpoons R-C(=O)-O-R' + H_2O$$

Abb.190.1 *Reaktion einer Carbonsäure mit einem Alkohol*

Beispiel 12.2

Formuliere die Reaktionsgleichungen für die Reaktion von Ethansäure und Pentan-1-ol:

$$H_3C-C(=O)-OH + HO-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3 \rightleftharpoons H_3C-C(=O)-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3 + H_2O$$

Abb. 190.2 *Reaktion von Ethansäure mit Pentan-1-ol*

Abb. 190.3 *Ethansäure-1-pentylester*

Abb. 190.4 *Klebstoff*

Abb. 190.5 *Waben aus Bienenwachs*

Abb. 190.6 *Arzneimittel*

Einige Carbonsäureester, ihre Eigenschaften und Verwendungen

(some carboxylate esters, their properties and uses)

Ester	Eigenschaften und Verwendung
Fruchtester (Ester kurzkettiger Carbonsäuren und kurzkettiger Alkohole) z. B. Methansäureethylester, Butansäurepropylester	Farblose, brennbare Flüssigkeiten, fruchtartiger Geruch. Verwendung als Lösungsmittel (z. B. für Lacke, Klebstoffe-**Abb. 190.4**), Aromastoffe
Fette (Ester von Fettsäuren und dem Alkohol Glycerin – Triglyceride) – **Abb. 193.4**	Je nach den enthaltenen Fettsäuren sind Fette flüssig oder fest. Flüssige Fette (Öle) enthalten mehr ungesättigte Fettsäuren.
Wachse (Ester von Fettsäuren mit langkettigen Alkoholen) – z. B. Bienenwachs	Bienenwachskerzen. Die meisten Kerzen bestehen heute aber hauptsächlich aus den Kohlenwasserstoffen Stearin und Paraffin **(Abb. 190.5)**.
Acetylsalicylsäure (Ester der Essigsäure mit der OH-Gruppe der Salicylsäure). O OH O O CH_3	Schmerzstillender und Fiebersenkender Wirkstoff in Arzneimitteln (z. B. ASPIRIN®) – **Abb. 190.6**
Polyester (langkettige Makromoleküle, deren Bausteine über Esterbindungen verknüpft sind)	z. B. Herstellung von Fasern, Folien und Harzen für Lacke

Tab. 191.1

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du das Herstellungsverfahren für einige Ester beschreiben. Du kannst auch fachspezifische Informationen über ihre Bedeutung in der Industrie aus verschiedenen Medien beschaffen.

Ü12.25 Methansäureethylester wird z. B. als Lösungsmittel für Klebstoffe **(Abb. 190.4)** verwendet. Formuliere die Reaktionsgleichung für die Bildung von Methansäureethylester aus Methansäure und Ethanol.

Ü12.26 In der obenstehenden Tabelle findest du Acetylsalicylsäure, ein Ester aus Ethansäure und der Salicylsäure. Zeichne die Strukturformel der Salicylsäure.

Ü12.27 Bei einem Triglycerid sind alle drei OH-Gruppen des dreiwertigen Alkohols Glycerin mit Fettsäuren verestert. Was sind Monoglyceride bzw. Diglyceride?

Ü12.28 Zeichne die Strukturformel eines Monoglycerids. Verwende dazu den Alkohol Glycerin und ein Molekül Stearinsäure ($C_{17}H_{35}COOH$).

Ü12.29 *Esters are important compounds in nature and in industry. Give some examples.*

13 Reinigungsmittel

In diesem Kapitel geht es um

- **Seife**
- **Waschmittel**

13.1 Seife *(soap)*

Seifen sind Gemische der Natrium- oder Kaliumsalze von Fettsäuren.

Merk & Würdig

Seifen sind Gemische der Natrium- oder Kaliumsalze von Fettsäuren.

Herstellung von Seife *(production of soap)*

- **Neutralisation von Fettsäuren** mit Natronlauge oder Kalilauge

Experiment

Dieses Experiment kannst du unter Aufsicht deines Lehrers/deiner Lehrerin selbst durchführen.

Vorsicht! Schutzbrille tragen! Natronlauge ist ätzend!

Erwärme 0,6 g Stearinsäure auf einer kleinen Flamme zum Schmelzen. Gib langsam 2 ml Natronlauge (25%) dazu und erwärme unter ständigem Rühren weiter. Nach einigen Minuten verdünnst du die Mischung vorsichtig mit 10 ml Wasser.

Gib eine Probe davon in ein Reagenzglas, verschließe es und schüttle die Probe. Beschreibe deine Beobachtungen in kurzen Sätzen.

Abb. 193.1 *Seife*

Abb. 193.2

Abb. 193.3 *Neutralisation einer Fettsäure*

- **Verseifung von Fetten** mit Natronlauge oder Kalilauge.

Merk & Würdig

Verseifung nennt man die Spaltung eines Esters (z. B. mit verdünnten Laugen).

Experiment

Dieses Experiment kannst du unter Aufsicht deines Lehrers/deiner Lehrerin selbst durchführen.

Vorsicht! Schutzbrille tragen! Natronlauge ist ätzend!

Gib in ein 200 ml Becherglas ca. 10 g eines Fettes (z. B. Kokosfett) und 5 ml Wasser. Erwärme vorsichtig, bis das Fett geschmolzen ist und gib jetzt ganz langsam in kleinen Portionen 10 ml Natronlauge (25 %) und 5 ml Ethanol zu. Die Mischung kochst du ca. 25 Minuten bei nicht zu großer Hitze weiter. Rühre ständig um und ersetze das verdampfte Wasser durch destilliertes Wasser.

Danach gießt du die Mischung in eine gesättigte Kochsalzlösung, wobei sich die gebildete Seife abscheidet.

Gib eine Spatelspitze der gebildeten Seife und 10 ml Wasser in ein Reagenzglas. Verschließe das Glas und schüttle.
Beschreibe deine Beobachtungen in kurzen Sätzen.

Abb. 193.4 *Fettmolekül*

Abb. 194.1 *Verseifung eines Fettes mit Natronlauge*

Merk & Würdig

Fett + Natronlauge
↓
Seife + Glycerin

Beim Seifensieden werden die Rohstoffe durch Heißdampf erhitzt. Bei ca. 80°C erfolgt die Spaltung der Fette. Es entsteht eine Mischung aus Glycerin und Seife („**Seifenleim**"). Nach einer mehrstündigen Reaktionszeit wird die Mischung durch Zusatz von Natriumchlorid in zwei Phasen getrennt („**Aussalzen**"). Die Seife schwimmt auf der **Unterlauge**, die das Nebenprodukt **Glycerin** enthält.

Endprodukt ist die sogenannte Grundseife („**Kernseife**"). Zur Herstellung von **Toiletteseifen** müssen der Grundseife noch Zusatzstoffe beigefügt werden. Das sind z.B. Parfümöle, Farbstoffe, Rückfetter und Hautschutzstoffe. Manche Seifen enthalten bakterizide oder fungizide Verbindungen, die Bakterien bzw. Pilze abtöten („**Deo-Seifen**").

Abb. 194.2 *Kernseife*

Viele **Naturseifen** werden nur bei 40 °C („kalt") verseift. Man verwendet einen Überschuss an Fett. Dadurch wird die gesamt Lauge verbraucht, und die Seife muss nicht mehr ausgesalzen und von der Natronlauge gereinigt werden. Der gebildete Seifenleim erstarrt und wird in Stücke geschnitten. Solche Naturseifen enthalten noch das für die Haut wertvolle Glycerin.

Abb. 194.3 *Naturseifen*

Eigenschaften von Seife *(properties of soap)*

- Seife hat einen **pH-Wert von ca. 9 – 10**.
- In hartem Wasser reagiert sie mit Calcium-Ionen zu unlöslicher **Kalkseife**.

Experiment

Diese Experimente kannst du selbst durchführen.

1. Befeuchte ein Stück Kernseife mit destilliertem Wasser und lege einen Indikatorstreifen darauf. Welchen pH-Wert misst du?
2. Schabe etwas Kernseife in ein Gefäß und gib etwa 100 ml destilliertes Wasser dazu. Verschließe das Gefäß und schüttle.
   Nun bereitest du eine Lösung zu, die etwa 0,5 g Calciumchlorid in 50 ml Wasser enthält. Gieß einen Teil der Lösung zur Seifenlauge und schüttle wieder.

Beschreibe deine Beobachtungen der beiden Versuche in kurzen Sätzen.

Abb. 194.4 *Seife in destilliertem Wasser (links), mit Calcium-Ionen (rechts)*

Waschwirkung von Seife *(mechanism of washing effect of soap)*

- Die Bindung der Wassermoleküle untereinander bewirkt die **Oberflächenspannung** von Wasser. Es formt sich zu Tropfen. Auf hydrophoben Oberflächen perlt das Wasser ab, es ist **nicht benetzend** **(Abb. 195.1)**. Reines Wasser kann daher hydrophoben Schmutz nicht lösen.
- Beim Auflösen in Wasser zerfällt Seife in **Seifenanionen** und Natrium-Kationen. Für die Waschwirkung ist in erster Linie das Seifenanion verantwortlich.
- Seifenanionen besitzen eine lipophile/hydrophobe Kohlenwasserstoffkette und eine hydrophile/lipophobe Kopfgruppe **(Abb.195.2)**.
- Seife reichert sich vor allem an **Grenzflächen** (z. B. Wasser/Luft, Wasser/Fett) an und zerstört die Oberflächenspannung von Wasser. An der Grenzfläche von Wasser und Fett dringen die Kohlenwasserstoffketten in das Fett ein, die Kopfgruppen machen die Fettoberfläche hydrophil. Die Fettteilchen werden von der Unterlage abgehoben und im Waschwasser verteilt (emulgiert) **(Abb. 195.3)**.

Abb. 195.1 *Wasser ist nicht benetzend*

Abb. 195.2 *Aufbau eines Seifenanions*

Abb. 195.3 *Waschwirkung von Seife*

Experiment

Dieses Experiment kannst du selber durchführen.

Fülle ein Becherglas fast bis zum Rand mit destilliertem Wasser. Nun gib ein kleines Stück Filterpapier auf die Wasseroberfläche. Lege darauf eine Büroklammer. Das Papier sollte untergehen und die Büroklammer auf der Oberfläche bleiben. Jetzt gib ganz vorsichtig Spülmittel in das Wasser. Was passiert?

Erkläre deine Beobachtungen in einigen kurzen Sätzen.

Abb. 195.4 *Der Wasserläufer wird von der Oberflächenspannung des Wassers getragen.*

Seife ist ein Tensid[1] *(soap is a surfactant)*

Neben Seife gibt es eine Vielzahl von Substanzen, die die Oberflächenspannung von Wasser herabsetzen. Man nennt sie **Tenside**. Sie werden auch als **grenzflächenaktive Stoffe** bezeichnet. Tenside besitzen eine hydrophobe Kohlenwasserstoffkette und eine hydrophile Kopfgruppe.

Nach ihrer Kopfgruppe unterscheidet man

- **Anionische Tenside** (negativ geladene Kopfgruppe)
- **Kationische Tenside** (positiv geladene Kopfgruppe)
- **Nichtionische Tenside** (Kopfgruppe ist nicht geladen)
- **Amphotere Tenside** (Kopfgruppe ist positiv und negativ geladen)

Flüssigseifen sind wässrige Lösungen von Tensiden. Sie bilden, anders als Seife, in hartem Wasser keine Kalkseife. Sie sind auch nicht alkalisch. Beim Waschen mit Flüssigseifen wird daher der pH-Wert der Haut nicht verändert. Sie entfetten aber die Haut stärker als normale Seife.

Seifenblasen bestehen aus einer dünnen Wasserschicht, an die sich Tensid-Moleküle mit ihrer hydrophilen Kopfgruppe anlagern **(Abb. 195.6)**.

Merk & Würdig

Tenside sind Substanzen, die die Oberflächenspannung von Wasser herabsetzen.

Abb. 195.6 *Aufbau einer Seifenblase*

Abb. 195.5 *Seifenblasen*

[1] „tensio“ (lat.) = „Spannung“

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du einen Zusammenhang herstellen zwischen deinen Alltagserfahrungen und deinen erworbenen Kenntnissen über Tenside. Außerdem zeigst du, dass du dir Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen kannst.

Ü13.1 Suche auf Etiketten von Haushaltsreinigern (z. B. Spülmittel, Scheuermilch) die Zusammensetzung. Welche Arten von Tensiden sind in welcher Menge enthalten?

Ü13.2 *Which kind of surfactant is soap?*

Ü13.3 Die folgenden Abbildungen sollen die Anordnung von Tensidmolekülen an der Grenzfläche Wasser-Luft darstellen. Welche der Abbildungen A oder B ist richtig? Begründe deine Antwort!

Abb. 196.1

Ü13.4 Betrachte **Abb. 182.2**: Langkettige Alkohole besitzen die Struktur von Tensiden und sind daher grenzflächenaktive Stoffe. Zu welcher Gruppe von Tensiden würdest du sie zählen?

Ü13.5 Auf dem Etikett einer Flüssigseife findet sich folgende Zusammensetzung:

INGREDIENTS: AQUA, SODIUM LAURETH SULFATE, COCAMIDOPROPYL BETAINE, GLYCERIN, LACTIC ACID, COCAMIDE DEA, PARFUM, CITRIC ACID, SODIUM CHLORIDE, SODIUM BENZOATE, SODIUM SALICYLATE, POTASSIUM SORBATE, TETRASODIUM EDTA, PHENOXYETHANOL, CI 14720, CI 47005

Beantworte folgende Fragen mit Hilfe des Internets:

- Einer der Bestandteile ist das Tensid „SODIUM LAURETH SULFATE".
  - **a)** Was ist die deutsche Bezeichnung dieser Substanz?
  - **b)** Was ist die Kopfgruppe, welche Ladung trägt sie?
  - **c)** Welcher langkettige Alkohol wird für die Herstellung verwendet?
  - **d)** Zu welcher Gruppe von Tensiden gehört die Substanz?
- Ein anderes Tensid in dieser Flüssigseife ist „COCOAMIDOPROPYL BETAINE".
  - **e)** Zu welcher Gruppe von Tensiden gehört es?

Abb. 196.2

Thema & Gesellschaft

Zu häufiges Waschen schadet der Haut

Reinigung. Dermatologen empfehlen Mittel mit einem pH-Wert zwischen 4,8 und 6,0. Das schützt die Haut.

Hygiene ist wichtig für die Gesundheit. Das wird in Grippe- und Verkühlungszeiten besonders bewusst, wenn Händewaschen vor Ansteckung bewahrt. Doch zu häufiges Waschen, zu aggressive Waschmittel oder Desinfektionssprays machen eher krank als gesund. Nicht ganz unschuldig daran sind Werbekampagnen. So wird Konsumenten eingebläut, dass Hauttalg grundsätzlich übel riechend und schädlich sei und durch Cremes ersetzt werden müsse. Dabei ist der Talg wichtig für Schutz und Pflege der Haut – Lotionen, die viele Chemikalien enthalten, können ihn nicht ersetzen.

Der Mittelweg: Die Hautreinigung sollte eine möglichst geringe Entfettung, Austrocknung und Reizung der Haut bewirken. „Nicht geeignet sind gewöhnliche, handelsüblich parfümierte Seifen und Syndets. Tenside in flüssiger Form sind zu vermeiden. Schädlich ist langes, schaumiges Abseifen, denn es führt zu massiver Entfettung", erklären Dermatologen der Universitäts-Hautklinik Bochum. Besser seien feste Seifen und Syndets mit einem pH-Wert zwischen 4,8 und 6,0 – was dem natürlichen Säuremantel der Haut entspricht. Der pH-Wert zeigt an, ob eine Substanz alkalisch, sauer oder neutral ist. Liegt der pH-Wert unter sieben, ist die Substanz sauer; über sieben ist sie basisch, sieben ist der Neutralwert. Auch Wasser ohne Seife oder Syndets löst übrigens den Hauttalg und entfernt den Schweiß – heißes Wasser intensiver als kaltes.

13.2 Waschmittel *(laundry detergent)*

Waschmittel verwendet man zur Reinigung von Textilien.

Vollwaschmittel sind für fast alle Textilfasern bei Temperaturen zwischen 20°C bis 95 °C geeignet.

Die Hauptbestandteile eines Vollwaschmittels sind **(Abb. 197.1)**:

- **Tenside**
- **Bleichmittel**. Sie zerfallen bei höherer Temperatur und bilden Wasserstoffperoxid – H_2O_2. Dieses spaltet atomaren Sauerstoff ab und wirkt dadurch bleichend.

  $H_2O_2 \rightarrow H_2O + O$
- **Bleichaktivatoren** bewirken eine bleichende Wirkung bereits bei niedrigen Temperaturen.
- **Enthärter** entfernen Calcium-Ionen in hartem Wasser. Dadurch wird die Waschwirkung der Tenside verbessert und Kalkablagerungen in der Waschmaschine vermieden. Meist werden **Zeolithe** verwendet. Das sind Silicium-Verbindungen, wie z. B. Sasil®[1]. Sie geben Na^+-Ionen ab und binden Ca^{2+}-Ionen **(Abb. 197.2)**.
- **Optische Aufheller** („Weißmacher") lassen weiße Textilien „weißer" erscheinen. Nach mehrmaligem Waschen verfärbt sich weiße Wäsche leicht gelblich (Gelbstich). Optische Aufheller binden sich an die Faser und nehmen den unsichtbaren UV-Anteil von Sonnenlicht auf und geben blaues Licht ab **(Abb. 197.3)**. Diesen leichten Blaustich nehmen wir als besonders reines Weiß wahr.
- **Enzyme** sind Eiweißstoffe, die Verunreinigungen aus Eiweiß, Stärke und Fett in kleine Bruchstücke zerlegen. Diese können dann von der Faser abgehoben werden **(Seite 234)**.
- **Weitere Bestandteile** sind z. B. Duftstoffe, Stoffe, die die Waschmaschine vor Korrosion schützen, Schaumregulatoren u.a.

INHALTSSTOFFE
5 – 15 % anionische Tenside, Bleichmittel auf Sauerstoffbasis
unter 5 % nichtionische Tenside, Zeolithe, Phosphonate, Polycarboxylate
Enthält: Enzyme, optische Aufheller, Duftstoffe

Abb. 197.1 *Zusammensetzung eines Vollwaschmittels*

Abb. 197.2 *Modell von Sasil*

Abb. 197.3 *flüssiges Waschmittel bei Tageslicht und unter UV-Licht*

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du einen Zusammenhang herstellen zwischen deinen Alltagserfahrungen und deinen erworbenen Kenntnissen über Waschmittel. Du zeigst auch, dass du facheinschlägige Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen kannst.

Ü13.6 Im Zeitungsartikel „Zu häufiges Waschen schadet der Haut" **(Seite 196)** findet sich der Ausdruck „Syndet". Was versteht man darunter?

Ü13.7 Suche in einem Supermarkt, Drogeriemarkt o. ä. Vollwaschmittel, Buntwaschmittel und Feinwaschmittel. Lies die Beschreibungen auf den Packungen.
Was ist der Unterschied zwischen diesen Waschmitteln?

Ü13.8 Was versteht man unter Waschmittelallergie? Welche Substanzen in Waschmitteln sind dafür hauptsächlich verantwortlich? Suche Antworten auf diese Fragen z. B. im Internet.

[1] **Sasil** (**S**odium-**a**luminium-**sil**icate = Natrium-Aluminium-Silikat)

14 Arzneimittel

In diesem Kapitel geht es um

- **Arzneistoffe**
- **Arzneiformen (Darreichungsformen)**

14.1 Arzneistoffe *(active ingredients)*

Arzneistoffe sind jene Substanzen in einem Arzneimittel, die auf unseren Körper eine Wirkung ausüben (**Wirkstoffe**).

Zu den Wirkungen der Arzneistoffe im Organismus zählen u.a. folgende:

- **Ersetzen fehlender** oder zu gering vorhandener Stoffe (z. B. Insulin, Hormone),
- **Beeinflussung von Steuerungsvorgängen** (z. B. blutdrucksenkende Stoffe),
- **Blockieren der Informationsübertragung** zum Gehirn (z. B. Schmerzmittel),
- **direkte Wirkung auf Krankheitserreger** (z. B. auf Bakterien, Viren, Pilze)

Die meisten Arzneistoffe können neben den gewünschten Wirkungen aber auch unangenehme, zum Teil gefährliche **Nebenwirkungen** verursachen.

Abb. 199.1

Wirkung durch Rezeptoren *(mode of action by receptors)*

Die Zusammenarbeit der Zellen im Körper funktioniert nur durch ständigen Austausch von Informationen. Eine Zelle gibt **Botenstoffe** ab, die von einer anderen Zelle erkannt werden. Dafür sind bestimmte **Rezeptoren** notwendig. Das Molekül des Botenstoffes muss genau zum Rezeptor passen **(Abb. 199.2)**. Nur in diesem Fall wird das Signal übertragen. Bei der Wirkung der meisten Arzneistoffe spielen Rezeptoren eine wichtige Rolle. Wenn das Arzneimittelmolekül eine ähnliche Form wie der Botenstoff besitzt, kann es an den betreffenden Rezeptor gebunden werden. Es kann nun dieselbe Wirkung wie der Botenstoff auslösen oder die Rezeptoren für die Botenstoffe blockieren.

Abb. 199.2

Merk & Würdig

Antibiotika sind Substanzen, die bereits in geringer Konzentration Bakterien abtöten oder sie in ihrem Wachstum hemmen können.

Gewinnung von Arzneistoffen *(isolation of active ingredients)*

Arzneistoffe gewinnt man

- aus **Naturprodukten** (z. B. Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen),
- durch **chemische Änderung natürlicher Wirkstoffe**,
- durch **chemische Synthese**.

Beispiel 14.1

Antibiotika

Im Jahr 1928 entdeckte der englische Bakteriologe **Alexander Fleming** durch Zufall, dass der Pilz Penicillium notatum das Wachstum von Bakterienkulturen hemmte. Fleming vermutete, dass der Pilz einen Wirkstoff an die Umgebung abgegeben hatte und nannte diesen **Penicillin**.

Heute kennt man verschiedene Penicilline. Sie besitzen dasselbe Grundgerüst und unterscheiden sich nur durch ihre Seitenkette ***R*** **(Tabelle 199.1)**.

Name	Penicillin-Grundgerüst	Seitenkette R
Penicillin G	COOH, H_3C, H_3C, N, S, O, O, N H, **R**	CH_2–Phenyl
Penicillin F		CH_2 … CH_3
Penicillin K		CH_2 … CH_3

Tabelle 199.1 *Beispiele einiger natürlich vorkommender Penicilline*

Abb. 199.3
SIR ALEXANDER FLEMING

Durch chemische Veränderung der Seitenketten gewinnt man neue Antibiotika (z. B. Ampicillin, Methicillin u. a.).

Neben dem Penicillin und seinen Abarten gibt es noch verschiedene andere Gruppen von Antibiotika. Sie werden von anderen Mikroorganismen gebildet und besitzen eine andere Wirkung auf Bakterien (z. B. Cephalosporine, Streptomycine, Tetracycline).

Thema & Gesellschaft

Neue Waffe gegen Keime

Antibiotika. Forscher entdeckten, wie ein Eiweißmolekül gefährliche Bakterien zerstört. Das ist eine Hoffnung im Kampf gegen Resistenzen.

MARGIT MERTENS BONN (SN). Ein Wirkstoff, mit dem sich Pilze und niedere Tiere gegen Keime schützen, könnte sich als effizientes Antibiotikum entpuppen. Bonner Forscher konnten nun gemeinsam mit dänischen und holländischen Kollegen zeigen, wie das kleine Eiweißmolekül mit Namen Plectasin gefährliche Bakterien zerstört und selbst antibiotikaresistenten Staphylokokken den Garaus macht. Die Bonner Molekularbiologen Tanja Schneider und Hans-Georg Sahl hoffen, aus Plectasin schlagkräftige neue Antibiotika entwickeln zu können.

Immer mehr Bakterien sprechen auf gängige Antibiotika nicht mehr an. Das betrifft vor allem Staphylokokken: Gegen diese sogenannten MRSA-Stämme sind die Waffen der Pharmaforschung inzwischen weitgehend stumpf. Nach Schätzungen erkrankt in den USA bereits jeder zweite auf der Intensivstation behandelte Patient an einer MRSA-Infektion.

14.2 Arzneiformen *(Darreichungsformen) (dosage forms)*

Arzneistoffe können nur dann wirken, wenn sie in entsprechender Konzentration an den Wirkungsort gelangen. Man nennt dies **Bioverfügbarkeit**. Diese ist im Wesentlichen von der **Darreichungsform** des Arzneimittels abhängig **(Abb. 200.1)**.

Anwendung		Darreichungsform
lokal (auf die Haut oder Schleimhäute)		Salbe, Gel, Lösung, Spray *(ointment, hydrogel, solution, spray)*
enteral (über den Magen-Darm-Trakt)	**oral** (durch den Mund)	Tablette, Dragee, Filmtablette, Kapsel, Saft, Inhalationsspray *(tablet, dragee, film coated tablet, capsule, syrup, oral spray)*
	rektal (durch den After)	Zäpfchen *(suppository)*
parenteral (Umgehung des Magen-Darm-Traktes)		Injektion, Infusion *(injection, infusion)*
perkutan (durch die Haut)		Transdermales Pflaster *(transdermal patch)*

Tabelle 200.1 *Darreichungsformen von Arzneimitteln*

Abb. 200.1 *Arzneiformen und ihre Anwendungen*

Beispiel 14.2

Tabletten, Dragees, Filmtabletten

Tabletten sind die am meisten verwendete Arzneiform. Die Rohstoffe sind meist sehr feine Pulver, die nicht direkt zu Tabletten verpresst werden können. Sie werden daher mit Bindemitteln in größere Teilchen (bis zu 2 mm) überführt. Diesen Vorgang nennt man Granulieren. Die Granulatkörner besitzen eine raue Oberfläche. Beim anschließenden Pressvorgang können sie sich leicht ineinander verzahnen und ergeben damit stabile Tabletten.

Die verwendeten Hilfsstoffe sind **Füllstoffe** (z. B. Milchzucker), **Sprengmittel** (bewirken den Zerfall der Tabletten), **Bindemittel**, **Schmier-** und **Gleitmittel** (für ein besseres Fließen des Granulats in der Tablettenpresse).

Abb. 201.1 *Tablettenpresse*

Viele Tabletten werden noch mit einer Hülle überzogen:

- **Dragees** besitzen eine Hülle aus Zucker,
- **Filmtabletten** eine Hülle aus einer speziellen Lackschicht.

Die Hülle überdeckt z. B. einen unangenehmen Geschmack des Arzneistoffes. Dragees und Filmtabletten besitzen eine glattere Oberfläche und sind daher leichter zu schlucken als gewöhnliche Tabletten. Um die Tabletten leichter voneinander unterscheiden zu können, kann die Hülle eingefärbt werden. Für spezielle Anwendungszwecke können die Überzüge auch **magensaftresistent** gemacht werden, d. h. sie lösen sich nicht im Magen, sondern erst im Dünndarm auf. Das ist dann sinnvoll, wenn der Arzneistoff von der Magensäure angegriffen und zerstört würde oder wenn er direkt im Dünndarm seine Wirkung entfalten soll.

Zur Herstellung der Arzneiformen werden neben den wirksamen Arzneistoffen noch **Hilfsstoffe** benötigt. Diese besitzen keine medizinische Wirkung, sondern dienen nur als Füllstoffe, Bindemittel, Lösungsmittel, Stabilisatoren usw.

Bioverfügbarkeit *(bioavailability)*

Schluckt man z. B. eine Tablette, so wird sie sich im Verdauungstrakt (Magen, Darm) auflösen und ihren Wirkstoff freigeben. Dieser gelangt ins Blut und wird im Körper verteilt. Die Arzneistoffkonzentration im Blut steigt zuerst bis zu einem Höchstwert an. Durch den Abbau des Wirkstoffes nimmt sie dann langsam wieder ab. Um über einen längeren Zeitraum hinweg ständig eine gewisse Konzentration des betreffenden Arzneistoffes im Blut zu erhalten, sind mehrmalige Einnahmen notwendig **(Abb. 201.3)**.

Eine wesentlich praktischere Darreichungsform stellen sogenannte **Retardpräparate**[1] (*time-release dosage forms*) dar. Das können Tabletten oder Kapseln sein, die den Arzneistoff nicht auf einmal, sondern gleichmäßig über einen längeren Zeitraum (etwa 8 bis 12 Stunden) abgeben **(Abb.201.4)**.

Abb.201.2 *Feste orale Arzneiformen*

Wirkstoffkonzentration im Blut
optimale Konzentration
1.Tablette
2.Tablette
3.Tablette
Zeit

Abb. 201.3 *Konzentration eines nicht retardierten Wirkstoffs im Blut*

Wirkstoffkonzentration im Blut
optimale Konzentration
Retardtablette
Zeit

Abb. 201.4 *Konzentration eines retardierten Wirkstoffs im Blut*

[1] „retardare" (lat.) = „verzögern"

Übungen

Bei folgenden Übungen kannst du einen Zusammenhang herstellen zwischen deinen Kenntnissen über Arzneimittel und deinen Alltagserfahrungen. Außerdem beweist du, dass du Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen kannst.

Ü14.1 Grippe (Influenza) wird durch Influenza-Viren übertragen. Kann ein Antibiotikum zur Therapie von Influenza verwendet werden? Begründe deine Antwort.

Ü14.2 Verschiedene Bakterien zeigen Resistenz gegen Penicillin G. Was versteht man unter „Resistenz"? Wodurch entstehen Resistenzen? Beantworte die Fragen mit Hilfe anderer Bücher oder des Internets.

Ü14.3 Bei welcher Arzneiform wird der Wirkstoff schneller verfügbar sein: Tablette oder Infusion? Begründe deine Antwort.

Ü14.4 In den folgenden Abbildungen **a)** bis **h)** siehst du verschiedene Arzneiformen. Ordne den Bildern folgende Begriffe zu: Dragee, Filmtablette, Infusion, Injektion, Kapseln, Saft, Tropfen, Zäpfchen.

a) ______________________

b) ______________________

c) ______________________

d) ______________________

e) ______________________

f) ______________________

g) ______________________

h) ______________________

Ü14.5 Magensaftresistente Arzneiformen müssen stabil sein gegen einen ______________ (sauren/basischen) pH-Wert.

Ü14.6 *Which of the following dosage forms can have time-release properties? Infusion, injection, film coated tablets, capsules, syrup.*

15 Farbmittel

In diesem Kapitel geht es um

- **Farbstoffe**
- **Analyse von Farbstoffen**

Merk & Würdig

Farbmittel sind Farbstoffe und Pigmente.

Bei den **Farbmitteln** (*colourants*) unterscheidet man entsprechend ihrer Verwendungen und Eigenschaften:

- **Farbstoffe** – meist organische, lösliche Substanzen, z. B. zum Färben von Textilien, Lebensmittelfarbstoffe,
- **Pigmente** – meist anorganische, unlösliche Stoffe, z. B. zur Herstellung von Malerfarben, Lacken.

Abb. 204.1 *gefärbte Textilfasern*

Abb. 204.2 *Farbpigmente*

Abb. 204.3

Abb.204.4 *ein gelber Körper absorbiert blaues Licht*

Gegenstände erscheinen farbig, weil sie Teile des sichtbaren Spektrums absorbieren und den Rest reflektieren. Weißes Licht besteht aus den Grundfarben Rot, Grün und Blau. Erscheint ein Körper z. B. gelb, so absorbiert er Blau und reflektiert Rot und Grün (rotes und grünes Licht ergeben gelbes Licht).

Wiederhole dazu **Band 3, Kapitel 3.2.2**.

15.1 Farbstoffe *(dyes)*

Chromophore[1] *(chromophores)*

Chromophore sind Gruppierungen im Molekül, die für das farbige Aussehen eines Stoffes verantwortlich sind. Sie werden durch Licht bestimmter Wellenlänge(n) zum Schwingen angeregt. Dadurch wird dieser Anteil des Lichts „verbraucht", er wird absorbiert. Der restliche Anteil wird reflektiert. Der Gegenstand erscheint in der Farbe des reflektierten Lichts.

Meist enthalten Farbstoffmoleküle neben den chromophoren Gruppen noch weitere Gruppen, welche die Farbe verstärken.

Abb. 204.5 *Karotten*

Ergänzung & Ausblick

Auch die Funktionsweise von **Indikatoren** hängt mit der Lichtabsorption ihrer Moleküle zusammen.

Zum Beispiel Phenolphthalein: Je nach pH-Wert ändert sich in einer Gleichgewichtsreaktion die Molekülstruktur. Mit der Änderung der chromophoren Gruppen tritt auch eine Änderung der Farbe ein. Im neutralen und sauren Bereich ist der Indikator farblos, im alkalischen (bei einem Überschuss an OH^--Ionen) intensiv rot gefärbt.

Abb. 204.6

[1] „chromophor" (griech.) = „Farbträger"

Beispiel 15.1

Carotinoide

Die abwechselnde Aneinanderreihung von Einfach- und Doppelbindungen nennt man **konjugierte Doppelbindungen**. Sie sind die Chromophore von **β-Carotin**, dem Farbstoff von Karotten. Außerdem sind sie in allen **Carotinoiden** enthalten. Das sind Stoffe, die eine ähnliche Struktur wie β-Carotin besitzen.

Carotinoid	Struktur	Vorkommen
β-Carotin (orange-rot)		Karotten, grüne Blätter
Zeaxanthin (gelb)		Mais, Eigelb, Spinat
Canthaxanthin (rosarot)		Krabben, Garnelen, Flamingofedern
Lycopin (rot)		Tomaten, Wassermelonen

Tabelle 205.1 *Einige Carotinoide*

Carotinoide sind neben Chlorophyll auch in grünen Blättern vorhanden. Die Färbung der Carotinoide wird allerdings so lange durch Chlorophyll überdeckt, bis dieses im Herbst zersetzt und nicht mehr nachgebildet wird. Das Herbstlaub erhält seine bunte Färbung durch die stabileren Carotinoide.

Abb. 205.1 *Karotten* **Abb. 205.2** *Mais* **Abb. 205.3** *Garnelen* **Abb. 205.4** *Wassermelonen* **Abb. 205.5** *Herbstlaub*

Naturfarbstoffe *(natural dyes)*

Früher kannte man zum Färben von Textilien nur Stoffe aus der Natur. Die wichtigsten Naturfarbstoffe stammten von Pflanzen oder Tieren.

- Aus **Pflanzen** z. B. der blaue **Indigo** oder der tiefrote **Krapp**.
- Aus **Tieren** z. B. der aus der Cochenilleschildlaus gewonnene rote **Karmin** oder der echte **Purpur** aus der Purpurschnecke.

Echter Purpur ist einer der teuersten Farbstoff der Welt (Preis 2013: etwa 2 500 € pro Gramm). Zur Herstellung von 1 g benötigt man ca. 10 000 Purpurschnecken. Im römischen Reich war daher das Tragen von Gewändern, die mit echtem Purpur gefärbt waren, nur dem Kaiser und höchsten Beamten vorbehalten.

Abb. 205.6 *Cochenilleschildläuse*

Abb. 206.2 *Purpurschnecken*

Abb. 206.1 *Purpur*

Alle Naturfarbstoffe können heute künstlich hergestellt werden.

Abb. 206.3 *Wolle gefärbt mit natürlichen Pflanzenfarbstoffen*

Färbeverfahren von Textilien *(dyeing processes of textile products)*

Je nach Faser (pflanzliche, tierische, synthetische Faser) werden unterschiedliche Farbstoffe und Färbemethoden angewendet, z. B.:

- Bei der **Direktfärbung** werden Farbstoffmoleküle z. B. durch Wasserstoffbrückenbindung an die Faser gebunden. Wenn die Farbstoffmoleküle nicht geladen sind, nennt man den Vorgang **Substantivfärbung**.

Experiment

Dieses Experiment kannst du selber durchführen.

Fülle ein 500 ml Becherglas etwa zur Hälfte mit Wasser. Gib nun einen Beutel Schwarztee und einige weiße Wollfäden hinein. Koche die Mischung ca. 20 Minuten und lass sie abkühlen. Spüle dann die Fäden aus und trockne sie.

Dieses Experiment kannst du mit verschiedenen anderen natürlichen Farbstoffen (z. B. blaue Zwiebelschalen, Haselnussblätter, Krappwurzel, Blätter der Schafgarbe u.a.) durchführen.

Abb. 206.4 *β-Naphthol*

- **Entwicklungsfarbstoffe** werden aus kleinen, ungefärbten Farbstoffmolekülen direkt an der Faser gebildet.

Experiment

Dieses Experiment kannst du unter Aufsicht deines Lehrers/deiner Lehrerin selber durchführen.

1. **Zubereitung der Diazoniumsalzlösung**
   Löse eine Spatelspitze Sulfanilsäure in 10 ml verdünnter Natronlauge und 1 Spatelspitze Natriumnitrit in 20 ml Wasser. Vermische die beiden Lösungen. Kühle auf dem Eisbad ab und gib vorsichtig 20 ml verdünnte Salzsäure dazu. Beobachte die Temperatur! Die Mischung soll sich höchstens auf 5 °C erwärmen.
2. **Zubereitung der Naphthol-Lösung**
   Löse eine Spatelspitze β-Naphthol in 50 ml Wasser und gib 10 ml verdünnte Natronlauge dazu.
3. **Färbung eines Wollfadens**
   Tränke einen weißen Wollfaden mit der Naphthollösung. Tauche ihn danach in die Diazoniumsalzlösung. Wasche den gefärbten Faden in Wasser.

Im ersten Schritt wird die **Kupplungskomponente** (im Experiment β-Naphthol) an die Faser gebunden.

Im zweiten Schritt (Diazotierung) reagiert die Kupplungskomponente mit dem **Diazoniumion**, das aus Sulfanilsäure und Natriumnitrit entsteht:

HO
HO_3S–C₆H₄–$N{\equiv}N^+$ + β-Naphthol → HO_3S–C₆H₄–N=N–(HO)-Naphthyl

Diazoniumion β-Naphthol β-Naphthylorange

Abb. 207.1

Dabei bildet sich die **Azogruppe (–N=N–)**. Zwei aromatische Ringe, die über eine Azogruppe verbunden sind, sind der Chromophor der **Azofarbstoffe**. Seitengruppen bewirken die unterschiedlichen Färbungen der Azofarbstoffe.

Merk & Würdig !

Farbstoffe mit der **Azogruppe –N=N–** nennt man **Azofarbstoffe**.

- **Indigofarbstoffe**
  Der blaue Indigo ist in Wasser unlöslich. Er wird daher zuerst zu einer löslichen Form reduziert. Diese ist farblos (**Leukoindigo**). Mit dieser Lösung tränkt man das Gewebe gleichmäßig und lässt es anschließend an der Luft trocknen. Der Luftsauerstoff oxidiert nun die Leukoform wieder zum Farbstoff, der jetzt als unlösliche Substanz fest in der Faser haftet.

Reduktion ⇌ Oxidation

Indigo (blau) Leukoindigo (farblos)

Abb. 207.2

Abb. 207.3 *Indigo ist der Farbstoff von Jeansstoffen*

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du einen Zusammenhang herstellen zwischen deinen erworbenen Kenntnissen und deinen Alltagserfahrungen. Du beweist, dass du facheinschlägige Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen kannst. Du stellst Zusammenhänge her zwischen Eigenschaften von Farbstoffen und ihrer Struktur.

Ü15.1 **a)** Aus welchen drei Grundfarben besteht weißes Licht?

b) Ein Pullover erscheint in weißem Licht grün, weil er die Grundfarben ____________ und ____________ absorbiert und ____________ reflektiert.

Ü15.2 Überlege: Was sind wichtige Voraussetzungen, damit eine Substanz als Textilfarbstoff verwendet werden kann? Versuche die Frage auch mit Hilfe des Internets zu beantworten.

Ü15.3 Pigmente sind die farbgebenden Bestandteile von Malerfarben und Lacken.

a) Was sind die Hauptbestandteile eines Lacks?

b) Welche Aufgaben haben sie?

Beantworte diese Fragen mit Hilfe anderer Medien.

Übungen

Ü15.4 Die folgenden Strukturformeln zeigen die Moleküle von zwei Farbstoffen bei saurem bzw. basischem pH-Wert:

Substanzen	sauer	basisch
A		
B		

Könnten die Substanzen A bzw. B als Säure-Base-Indikatoren verwendet werden? Begründe deine Antwort.

Ü15.5 Welche der folgenden Substanzen sind Azofarbstoffe?

a) ☐

b) ☐

c) ☐

d) ☐

15.2 Analyse von Farbstoffen *(analysis of dyes)*

Dünnschichtchromatografie *(thin layer chromatography)*

Experiment

Dieses Experiment kannst du alleine durchführen.

Auf einem rechteckigen Filterpapier ziehst du etwa 2 cm vom unteren Rand mit dem Lineal einen dünnen Bleistiftstrich (Startlinie). Auf diesen Strich trägst du im Abstand von etwa 2 cm nebeneinander kleine Punkte von verschiedenfarbigen (wasserlöslichen) Filzstiften auf. Nach dem Trocknen der Farben drehst du das Papier zu einem Zylinder und fixierst ihn mit einer Büroklammer. Stelle nun das Papier in ein Becherglas, das ca. 1 cm hoch mit einem Gemisch von zwei Teilen Wasser und einem Teil Ethanol gefüllt ist. Die Farbpunkte dürfen dabei nicht in das Lösungsmittel eintauchen! Die Flüssigkeit wird vom Papier nach oben gesaugt und nimmt die einzelnen Bestandteile der Farben unterschiedlich weit mit **(Abb. 208.1)**. Wenn das Lösungsmittel etwa 2 cm vom oberen Rand entfernt ist, nimmts du das Papier aus dem Becherglas. Markiere die Lösungsmittelfront mit einem dünnen Bleistiftstrich und trockne das Papier.

Suche nun im Chromatogramm einen kräftigen Farbpunkt und miss seinen Abstand von der Startlinie. Nun misst du den Abstand von der Startlinie zur Lösungsmittelfront. Berechne den R_f-Wert dieser Substanz nach folgender Formel:

$$R_f = \frac{\text{Strecke zwischen Startlinie und Substanz}}{\text{Strecke zwischen Startlinie und Lösungsmittelfront}}$$

Abb. 208.1

Bei der Chromatografie unterscheidet man:

- **Stationäre Phase** (z. B. Papier, saugfähige Schicht auf Glasplatten) und
- **Mobile Phase** (Lösungsmittelgemisch, „Laufmittel").

Vorgänge bei der Auftrennung des Substanzgemischs **(Abb. 209.1)**:

1. Schritt: Das Gemisch löst sich in der mobilen Phase.

2. Schritt: Die einzelnen Bestandteile des Gemisches haften unterschiedlich stark an der stationären Phase. Deshalb werden sie von der mobilen Phase mit unterschiedlicher Geschwindigkeit nach oben befördert und trennen sich dabei voneinander.

Der R_f-Wert (**Retentionsfaktor**[1)]) gibt an, wie weit eine Substanz gewandert ist. Gleiche Substanzen wandern unter gleichen Bedingungen (stationäre Phase, mobile Phase) immer gleich weit, d. h., sie besitzen immer denselben R_f-Wert.

Die **Dünnschichtchromatografie** ist ein häufig eingesetztes Verfahren in der analytischen Chemie. Es kann nicht nur bei Farbstoffen verwendet werden.

Abb. 209.1 *Dünnschichtchromatogramm von Filzstiften (von links nach rechts: Gelb, Orange, Rosa, Hellgrün, Hellblau, Dunkelblau, Violett, Schwarz)*

Spektralphotometrie *(spectrophotometry)*

Durch die Messung der Absorption von Licht bestimmter Wellenlängen kann man eine Substanz sowohl qualitativ als auch quantitativ bestimmen. Man verwendet sichtbares Licht, UV-Licht oder IR-Licht.

Beispiel 15.2

Qualitative Analyse

Eine Probe der zu untersuchenden Substanz wird in einem geeigneten Lösungsmittel gelöst (z. B. Wasser, Ethanol). Diese Lösung wird in einem Glasgefäß, einer sogenannten Küvette, mit Licht durchstrahlt. Dabei wird die Wellenlänge des eingestrahlten Lichts gleichmäßig verändert. Die Intensität des aus der Lösung austretenden Lichts wird gemessen. Auf diese Art entstehen Absorptionskurven, sogenannte **Spektren**. Aus ihnen kann man erkennen, bei welchen Wellenlängen eine Substanz Licht absorbiert **(Abb. 209.2)**.

Abb. 209.2 *Spektralphotometer*

Abb. 209.3 *Aufbau eines Spektralfotometers*

Abb. 209.4 *Absorptionsspektren von drei Farbstoffen im sichtbaren Licht und UV-Licht*

Ungefärbte Substanzen geben im sichtbaren Licht keine Absorption. Verwendet man UV- bzw. IR-Licht, so erhält man UV- bzw. IR-Spektren. Besonders die **IR-Spektren** sind für eine Substanz charakteristisch. Sie sind wie ein Fingerabdruck der Substanz und können zu ihrer Identifizierung verwendet werden **(Band 2, Seite 145 und Band 3, Kapitel 6.3)**.

[1)] „retinere" (lat.) = „zurückhalten"

Beispiel 15.3

Quantitative Analyse

Die Absorption einer Substanz ist von ihrer Konzentration abhängig, d.h. eine Lösung mit einer höheren Konzentration absorbiert stärker als eine mit geringerer Konzentration. Diese Eigenschaft kann zur quantitativen Analyse von Substanzen verwendet werden:

Für die nebenstehende Abbildung wurde die Absorption von verschieden konzentrierten Lösungen von Methylenblau gemessen. Aus diesen Werten kann man eine Gerade (**Eichgerade**) erstellen. Kennt man die Absorption einer Methylenblau-Lösung unbekannter Konzentration so lässt sich diese aus der Eichgeraden ermitteln.

Abb. 210.1 *Eichgerade von Methylenblau*

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du verschiedene Analyseverfahren anwenden und auswerten kannst.

Ü15.6 *In a chromatography experiment, eight coloured substances were spottet on to a piece of filter paper. There were the basic colours red, blue and yellow. The other five were dyes, labelled A – E. The resulting chromatogram is shown below:*

a) *Which dye contains only one basic colour (which one)?*

b) *Which dyes contain the basic colours red and yellow?*

c) *Which dye contains only the colours red and blue?*

d) *Which basic clolours contain dye E?*

e) *Which of the basic colours is most soluble in ethanol?*

f) *Which of the basic colours is better soluble in ethanol: blue or yellow?*

Abb. 210.2

Ü15.7 Bei der Analyse einer Substanz erhält man das folgende sichtbare Spektrum:
Welche Farbe besitzt die Substanz? Vergleiche das Spektrum mit den Spektren von **Beispiel 15.2** und überlege, in welchen Bereichen Licht absorbiert wird.

Abb. 210.3

Übungen

Ü15.8 Die nebenstehende Grafik **(Abb. 211.1)** stellt das Spektrum einer Substanz (Rhodopsin) dar. Welche der foldenden Aussagen ist (sind) richtig? (vergleiche dazu die **Abb. 209.4**)

- ☐ Die Substanz ist farblos.
- ☐ Die Substanz absorbiert sichtbares Licht.
- ☐ Die Substanz ist rot gefärbt.
- ☐ Die Substanz besitzt eine maximale Absorption bei 500 nm.

Absorption
700 600 500 400
Wellenlänge (nm)

Abb. 211.1

Ü15.9 Die quantitative Bestimmung von Glucose in verschiedenen Proben soll mit Hilfe der Spektralphotometrie erfolgen. Zur Erstellung der Eichgeraden wurde reine Glucose in mehreren Schritten verdünnt (10, 20, 30, 40 µg/ml). Nach Zusatz bestimmter Nachweisreagenzien gibt Glucose eine orange Färbung. Die Absorption der Eichlösungen sowie der drei Probelösungen wurde bei 490 nm gemessen. Dabei erhielt man folgende Ergebnisse:

Konzentration (µg/ml)	Absorption
10	0,12
20	0,25
30	0,38
40	0,50
Probe 1	0,30
Probe 2	0,45
Probe 3	0,20

Absorption
0,5 0,4 0,3 0,2 0,1
0 10 20 30 40 50
Konzentration(µg/ml)

Erstelle mit diesen Angaben eine Eichgerade und bestimme anschließend die Menge an Glucose in den drei Proben.

16 Kunststoffe

In diesem Kapitel geht es um

- Natürliche Makromoleküle
- Kunststoffe
- Kunststoffe und Umwelt

16.1 Natürliche Makromoleküle *(natural occuring macromolekules)*

Der deutsche Chemiker Hermann Staudinger[1] **(Abb. 213.1)** gilt als Begründer der makromolekularen Chemie. 1953 erhielt er für seine Entdeckungen auf dem Gebiet der makromolekularen Chemie den Nobelpreis für Chemie.

Makromoleküle[2] sind **Riesenmoleküle** mit einer Molekülmasse von mehr als 10^4 u.

Makromoleküle bestehen meist aus mehreren Tausend gleichen oder verschiedenen Einzelmolekülen. Dann spricht man auch von **Polymeren**[3]. Ihre kleinsten Bausteine nennt man **Monomere**[4].

Natürliche vorkommende Makromoleküle sind z. B.

- **Polysaccharide** (z. B. Stärke, Cellulose) – **(Seite 224)**
- **Eiweißstoffe** (Proteine) – **(Seite 228)**
- **Nucleinsäuren** (DNA, RNA) – **(Seite 243)**
- **Kautschuk** (Rohstoff für die Herstellung von Gummi)

Abb. 213.1 *HERMANN STAUDINGER*

Gummi *(rubber)*

Viele Pflanzen sondern beim Anschneiden von Blättern oder Rinde einen milchigen Saft (**Latex**) ab. Dieser bildet beim Trocknen einen Schutzfilm. Besonders reichlich fließt er aus dem tropischen **Gummibaum**.

In Plantagen wird Latex gewonnen, indem man schräge Kerben in die Rinde der Gummibäume einschneidet. Der ausfließende Saft wird gesammelt. Naturkautschuk ist eine Emulsion von **Polyisopren** in Wasser. Das Polymer besteht aus etwa 30 000 Isopren-Monomeren. Bei Zusatz von verdünnten Säuren oder durch Hitze wird das im Saft enthaltene Polymer (**Naturkautschuk**[5] – *natural rubber*) fest.

Abb. 213.2 *Einschneiden eines Gummibaums*

H_3C, H_2C, CH_2

Abb. 213.3 *Isopren*

H_3C H_3C H_3C H_3C

Abb. 213.4 *Polyisopren*

Zur Herstellung von Gummi werden die einzelnen Kautschuk-Ketten mit Hilfe von Schwefel zu einem Netz verbunden. Diesen Vorgang nennt man **vulkanisieren**. Gummi ist daher elastisch, d.h., nach einer Verformung kehrt er wieder in den ursprünglichen Zustand zurück. **Charles Nelson Goodyear**[6] **(Abb. 213.6)** erfand die Vulkanisation.

Merk & Würdig

Gummi entsteht durch Vulkanisieren von Kautschuk.

Dabei werden die Polymerketten durch Schwefel vernetzt.

Abb. 213.5 *Schwefelbrücken zwischen Kautschukketten*

Bei der Vulkanisation unterscheidet man zwei Verfahren:

- **Heißvulkanisation** – Bei den meisten Gummiprodukten (z. B. Autoreifen) werden die vorgemischten Rohmassen (Kautschuk, Schwefel, Farbstoffe u. a.) in entsprechenden Formen bei Temperaturen von 80 bis 160 °C heiß vulkanisiert.
- **Kaltvulkanisation** – Für die Herstellung dünner Gegenstände (z. B. medizinische Handschuhe, Kondome) werden die jeweiligen Formen mehrmals in eine Mischung aus Latex und den notwendigen Zusätzen eingetaucht, bis sich die gewünschte Wandstärke gebildet hat. Anschließend erfolgt mit Hilfe verschiedener Schwefelverbindungen (z. B. Schwefelkohlenstoff) die Vulkanisation.

Um den großen Bedarf an Gummi zu decken, verwendet man heute überwiegend künstlichen Kautschuk (**Synthesekautschuk** – *synthetic rubber*).

Abb.213.6 *CHARLES NELSON GOODYEAR*

[1] Hermann Staudinger, (1881 – 1965), gilt als Begründer der makromolekularen Chemie
[2] „makros" (griech.) = „groß"
[3] „poly" (griech.) = „viel", „meros" (griech.) = „Teil"
[4] „mono" (griech.) = „eins"
[5] „cao" (indian.) = „Baum", „ochu" (indian.) = „Träne"
[6] Charles Nelson Goodyear (1800 – 1860) war ein US-amerikanischer Chemiker.

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du deine Kenntnisse über Kautschuk und Gummi mit deinen Alltagserfahrungen in Zusammenhang bringen. Außerdem kannst du facheinschlägige Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen.

Ü16.1 Charles Goodyear soll angeblich die Vulkanisation durch Zufall entdeckt haben. Welches „Missgeschick" ist ihm dabei passiert?

Ü16.2 Auf einer Internetseite kann man über die Pflege von Gummibäumen (als Zimmerpflanzen) folgendes lesen: *„Wer den ganzen Stamm schneiden will kann eine Gartenschere nutzen. Danach wird der Gummibaum allerdings „bluten", d.h., es tritt eine milchige Flüssigkeit aus. Diese Stelle sollte verschlossen werden. Manchmal wird das kurze Anfackeln mit einem Feuerzeug zum Wundverschluss empfohlen."* Erkläre, was dabei passiert.

Ü16.3 Gummi kann weich oder sehr hart sein. Wodurch unterscheidet sich weicher, elastischer Gummi von Hartgummi?

Abb. 214.1

16.2 Kunststoffe *(plastics)*

Kunststoffe sind Materialien, die künstlich oder durch chemische Änderung natürlicher Makromoleküle hergestellt werden.

Herstellung *(production)*

Die Monomeren werden durch **Polymerisation** zu Polymeren verknüpft. Nach dem Reaktionsmechanismus unterscheidet man:

- **Kettenwachstumsreaktion (Kettenpolymerisation)** – *chain polymerization*
  Bei der Kettenpolymerisation wächst die Kette ausgehend von einem Startermolekül.

Beispiel 16.1

Kettenpolymerisation

Der Reaktionsablauf der Kettenpolymerisation lässt sich in mehrere Phasen unterteilen:

- **Startreaktion:** Ein **Initiator**-Molekül wird aktiviert. Dabei entstehen z. B. zwei Atome oder Atomgruppen mit freien Elektronen (**Radikale**). Diese sind sehr reaktionsfähig.

- **Kettenwachstumsreaktion:** Jedes Radikal greift ein Monomer an. Unter Aufspaltung von Mehrfachbindungen werden die Monomeren zu einer Kette gebunden. Dies geschieht wie das Auffädeln von Perlen.

  usw.

  Die Anzahl der Monomeren in der Kette nennt man **Polymerisationsgrad**. Er ist mitverantwortlich für die Eigenschaften des Kunststoffes.

- **Kettenabbruchreaktion:** Die Reaktion kommt zum Stillstand, z. B. wenn zwei aktive Moleküle miteinander reagieren.

- **Stufenwachstumsreaktionen** (*step-growth polymerization*)
  Die Stufenwachstumsreaktion benötigt keinen Initiator. Die Moleküle reagieren direkt miteinander. Stufenwachstumsreaktionen sind
  - **Polykondensation** (*condensation polymerisation*)
  - **Polyaddition** (*addition polymerization*)

Beispiel 16.2

Polykondensation

Bei der Kondensationsreaktion reagieren zwei Moleküle unter **Abspaltung von Nebenprodukten** (z. B. Wasser, HCl) miteinander.

Die wichtigsten Kondensationsreaktionen sind die Bildung eines Carbonsäureesters (Seite 190) und die Bildung eines Amids (Seite 228)

Carbonsäureester: R–COOH + HO–R → R–COO–R + H_2O

Carbonsäureamid: R–COOH + H_2N–R → R–CO–NH–R + H_2O

Wenn jedes Monomer 2 funktionelle Gruppen besitzt, können sie sich zu langen Ketten verbinden.
So entstehen **Polyester** bzw. **Polyamide**.

HO–R–OH + HOOC–R–COOH + HO–R–OH + HOOC–R–COOH → ···R–O–CO–R–CO–O–R–O–CO–R–CO–O···

Abb. 215.1 *Eine Dicarbonsäure und ein Diol reagieren zu einem Polyester.*

Experiment

Dieses Experiment kannst du mit Hilfe deiner Lehrerin/deines Lehrers selber durchführen:

Löse in einem Becherglas 2 g Adipinsäuredichlorid in 50 ml Petrolether. Darüber schichtest du vorsichtig eine Lösung von 3 g Hexamethylendiamin und 0,5 g Natriumcarbonat in 50 ml Wasser.

An der Grenzfläche der beiden Flüssigkeiten bildet sich ein Film aus Nylon. Du kannst ihn mit einer Pinzette vorsichtig herausziehen und zu einem langen Faden aufwickeln.

ClOC–C_4H_8–COCl — Adipinsäuredichlorid

H_2N–C_6H_{12}–NH_2 — Hexamethylendiamin

Abb. 215.2 *Aufwickeln des Nylonfadens*

Beispiel 16.3

Polyaddition

Bei der Additionsreaktion reagieren zwei Moleküle **ohne Abspaltung von Nebenprodukten** miteinander. Die wichtigste Gruppe bilden die **Polyurethane (PUR)**. Sie entstehen aus Diisocyanaten mit Diolen.

Isocyanate besitzen die Gruppe **–N=C=O**

··· + O=C=N–R–N=C=O + O=C=N–R–N=C=O + O=C=N–R–N=C=O + ···
H–O–R–O–H   H–O–R–O–H
↓
···–CO–NH–R–NH–CO–O–R–O–CO–NH–R–NH–CO–O–R–O–CO–NH–R–NH–CO–···

Wenn man der Mischung Wasser zusetzt, entsteht Kohlenstoffdioxid. Dieses bildet in der Kunststoffmasse kleine Bläschen. Dadurch entstehen **Polyurethanschaumstoffe**. Sie werden zur Herstellung von Schwämmen, Matratzen u.a. verwendet.

Eigenschaften *(properties)*

Kunststoffe können aufgrund ihrer Eigenschaften eingeteilt werden in:

- **Thermoplaste** (*themoplastics*) – Sie bestehen aus nicht vernetzten Molekülketten und lassen sich in der Wärme verformen. Aus ihnen werden billige Massenartikel (Becher, Schüsseln etc.) hergestellt.
- **Elastomere** (*elastomers*) – Elastomere besitzen wenige Vernetzungen zwischen den Polymerketten. Werden sie durch eine Kraft aus ihrer Lage gebracht, versuchen sie wieder in den ursprünglichen Zustand zurückzukehren. Sie sind gummielastisch.
- **Duroplaste** (*thermosets*) – Bei einem hohen Vernetzungsgrad der Molekülketten sind die Kunststoffe hart und lassen sich auch in der Hitze nicht mehr verformen.

Experiment

Dieses Experiment kannst du selber zu Hause durchführen.

Nimm einen sauberen Joghurtbecher und lege ihn bei ca. 160 °C auf einer Alu-Folie o. ä. in den Backofen.

Beobachte und erkläre den Vorgang.

Abb. 216.1 *Joghurtbecher bei 160 °C*

Kunststoff	Monomer	Herstellung	Abkürzung	Verwendung
Polyethen **Polypropen**	Ethen Propen	Kettenpolymerisation	PE PP	Flaschen, Becher, Schüsseln, Verpackungsfolien u.a.
Polystyrol	Ethenylbenzen (Styrol)	Kettenpolymerisation	PS	Gehäuse in der Elektrotechnik, Becher, Flachen Geschäumt als Verpackungs- und Dämmmaterial (Styropor®)
Polyvinylchlorid	Chlorethen	Kettenpolymerisation	PVC	Kabelummantelungen, Rohre, Fensterprofile
Polyurethan	unterschiedliche Diiosocyanate und Diole	Polyaddition	PU	Textilfaser (Elastan), Matratzen, Autositze, Schwämme, Dämmmaterial
Polyester **Polyamide**	unterschiedliche Ausgangsstoffe	Polykondensation		Hauptsächlich als Textilfasern (Dralon, Nylon, Perlon)

Tabelle 216.1 *einige wichtige Kunststoffe*

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du deine Kenntnisse über die Herstellung von Kunststoffen mit deinen Alltagserfahrungen in Zusammenhang bringen. Außerdem kannst du facheinschlägige Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen.

Ü16.4 Erstelle eine Tabelle mit zwei Spalten. Notiere in der ersten Spalte Vorteile von Kunststoffen, in der zweiten Spalte ihre Nachteile.

Ü16.5 Aufgrund welcher Eigenschaften sind Kunststoffe so vielfältig verwendbar?

Ü16.6 Aus welchem Rohstoff werden heute die meisten Kunststoffe hergestellt?

a) Erdgas **b)** Kohle **c)** Cellulose **d)** Eiweiß **e)** Erdöl **f)** Stärke

Ü16.7 Suche in verschieden Medien nach Beispielen für Kunststoffe, die hergestellt wurden durch

a) Kettenpolymerisation **b)** Polykondensation **c)** Polyaddition

Übungen

Ü16.8 Im **Beispiel 16.2** ist die Reaktionsgleichung für die Entstehung eines Polyesters dargestellt. Stelle die allgemeine Reaktionsgleichung für die Bildung eines Polyamids auf.

Ü16.9 Welches Nebenprodukt entsteht bei der Reaktion von Adipinsäuredichlorid und Hexamethylendiamin?

Ü16.10 Schreib 20 Gegenstände in deiner Umgebung auf, die aus Kunststoff bestehen.

Ü16.11 Suche bei deinen Bekleidungsstücken die Materialzusammensetzung (z. B. 65 % Polyester, 35 % Baumwolle).

Ü16.12 Welche der folgenden Textilfasern sind Kunstfasern?

- ☐ Baumwolle
- ☐ Nylon
- ☐ Seide
- ☐ Polyester
- ☐ Leinen

Ü16.13 Viscose ist eine Textilfaser, die aus einem natürlichen Makromolekül durch chemische Veränderung hergestellt wird. Welches natürliche Makromolekül wird verwendet?

16.3 Kunststoffe und Umwelt *(plastics and environment)*

Wie können uns ein Leben ohne Kunststoffe kaum mehr vorstellen. Sie sind überall anzutreffen, in Haushalten, Schulen, Fabriken, Krankenhäusern. Autos bestehen zu einem großen Teil aus Kunststoffen.

Der Grund für diese vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ist u. a.

- ihr **geringes Gewicht**,
- ihre **leichte Verformbarkeit** und vor allem
- ihre **Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse**.

Diese Beständigkeit bedeutet aber andererseits auch ein Problem für die Umwelt. Die meisten Kunststoffe, die in den letzten fünfzig Jahren produziert wurden, sind immer noch im Umlauf. Der Kunststoff-Müll wird immer mehr.

Polyethen ist dabei das größte Problem. Es ist der meist verwendete Kunststoff in der Welt. Jedes Jahr werden weltweit etwa 600 Milliarden Kunststoffsäcke hergestellt[1]. Meist werden diese aber nur ein- oder zweimal verwendet und dann weggeworfen.

Abb. 217.1 *Kunststoffmüll*

Thema & Gesellschaft

350 Millionen pro Jahr: Kein Ende der Sackerlflut. Österreich geht einen anderen Weg.

EinkaufssackerIn aus Plastik haben immer mehr ausgedient: China, Australien, Spanien und Frankreich verbieten sie und setzen künftig auf umweltfreundlichere Materialien. Obwohl das Thema international heiß diskutiert wird, ist es in Österreich kein Thema. Hierzulande ist das Plastiksackerl unter Kunden nach wie vor beliebt. Trotz umweltfreundlicher Tragtaschen aus Stoff oder Papier werden insgesamt bis zu 350 Millionen PlastiksackerIn pro Jahr in Österreich verwendet.

Rund 20 Cent kostet ein Plastiksackerl in Österreich, das Gratissackerl ist zumindest im Supermarkt Geschichte. Daher würden die Österreicher auch sorgsamer mit den Taschen umgehen, heißt es vom Abfallverwertungsunternehmen ARA. Zudem seien sie in Österreich robuster und können daher mehrfach verwendet werden. In China beispielsweise sei das anders, so Christian Stieglitz, Geschäftsführer von ARA. „Das sind ganz dünne Kunststoffsäcke, die in großen Mengen in den Märkten abgegeben werden. Zweitens gibt es dort nirgends Sammelsysteme, sodass die dann meistens im Freien enden", sagte Stieglitz. In Österreich funktioniere zudem die Mülltrennung besser als in Fernost. Ein Verbot des Sackerls ist deswegen hierzulande kein Thema.

[1] Quelle: ROBIN WOOD-Magazin Nr.104/1.2010; Zeitschrift für Umweltschutz und Ökologie

Abb. 218.1 *Sammlung von Kunststoffabfällen*

Bekämpfung des Müllbergs

Zur Verringerung des Kunststoffmülls bieten sich zum Beispiel folgende Möglichkeiten an:

- **Wiederverwertung (Recycling)** durch **Einschmelzen**
  Unbrauchbar gewordene Kunststoffprodukte können eingeschmolzen und zu neuen Gegenständen verarbeitet werden. Die Trennung der Abfälle nach Kunststoff-Sorten (z. B. PE, PVC usw.) ist kaum möglich. Daher bestehen die neuen Produkte meist aus verschiedensten Kunststoff-Arten und besitzen eine geringere Qualität (z. B. Herstellung von Parkbänken). Man nennt dies auch **Downcycling**.
- **Wiederverwertung** durch **Spaltung der Makromoleküle**
  Durch Spaltung der langen Molekülketten der Kunststoffe können wieder Monomere gewonnen und daraus neue Kunststoffe hergestellt werden.
- **Verbrennung** von Kunststoffen in Kraftwerken zur **Energiegewinnung**.
- Verwendung von **abbaubarem Kunststoff**.
  Durch bestimmte Zusätze können Kunststoffe von Bakterien oder Sonnenlicht zersetzt werden.
- Verwendung von **Biopolymeren** statt synthetischer Kunststoffe.
- Einführung eines **Pfandsystems** für Kunststoffflaschen

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du die Bedeutung von Kunststoffen für Wirtschaft, Technik, Gesellschaft und Umwelt kennst. Außerdem kannst du dir Informationen aus verschiedenen Medien beschaffen.

Ü16.14 Aufgrund welcher Eigenschaften sind Kunststoffe so vielfältig verwendbar?

Ü16.15 Lies den Artikel „Thema & Gesellschaft" und beantworte folgende Fragen:

a) Wie viele „Plastiksackerl" werden in Österreich pro Jahr ungefähr verwendet?

b) In verschiedenen Ländern sind „Plastiksackerl" verboten. Gehört Österreich dazu?

Ü16.16 Nenne einige Möglichkeiten, die zu einer Verringerung des Kunstoff-Mülls beitragen können.

Ü16.17 Was versteht man unter Downcycling?

Ü16.18 Nenne einige natürlichen Polymere, aus denen „Biokunststoffe" hergestellt werden können.

17 Biomoleküle

In diesem Kapitel geht es um

- Biochemisch wichtige Moleküle
- Kohlenhydrate
- Lipide
- Proteine

17.1 Biochemisch wichtige Moleküle (Überblick)

(survey of basic biochemical molecules)

Energiereiche Nährstoffe
Katabolismus
Energiearme Endprodukte
Energiekreislauf
komplexe Biomoleküle
Anabolismus
einfache Zellbausteine

Abb. 220.1 *Schema des Metabolismus*

Die **Biochemie** (*biochemistry*) ist der Teil der Chemie, der sich mit den chemischen Vorgängen in Lebewesen beschäftigt, d.h. mit den Bausteinen der Zelle, ihrem Aufbau und Abbau.

Der Stoffwechsel der Zellen wird **Metabolismus** (*metabolism*) genannt.
Man unterscheidet

- **Katabolismus** (*catabolism*) – Abbau von Stoffen
- **Anabolismus** (*anabolism*) – Aufbau von Stoffen

Anabolika (*anabolics*) sind Stoffe, die den Aufbau von Eiweiß (Muskeln) im Körper fördern.

Merk & Würdig

Metabolismus ist der Stoffwechsel der Zelle.
Katabolismus ist der Abbau, **Anabolismus** der Aufbau von Stoffen.

Thema & Gesellschaft

Doping-Nebenwirkungen nicht unterschätzen

Freizeitkraftsportler greifen Fachleuten zufolge zunehmend zu leistungssteigernden Medikamenten. In der Hoffnung, durch dieses Doping Muskeln auf- und Fett abzubauen, setzen sie ihre Gesundheit aufs Spiel, warnt der Berufsverband Deutscher Internisten in Wiesbaden.

Zu den häufigsten unerwünschten Nebenwirkungen zählen demnach Haarausfall, Akne, Bluthochdruck, sich verschlechternde Leberwerte sowie Verletzungen an Bändern und Sehnen. Auch psychische Folgen wie zunehmende Aggressivität, Reizbarkeit, Depressionen und sogar Halluzinationen können vorkommen.

Durch die Einnahme von Anabolika kann es bei Männern außerdem sein, dass ihnen eine weibliche Brust wächst und sie unfruchtbar werden. Umgekehrt kann sich bei Frauen unter anderem die Brust zurückbilden, der Kehlkopf vergrößern und die Stimme tiefer werden. Hoch dosierte Wachstumshormone führen schlimmstenfalls dazu, dass die Gesichtsknochen und Organe wuchern sowie Tumore schneller wachsen, warnt der Berufsverband.

Abb. 220.2 *Muskelaufbau durch Anabolika*

WHAT ARE THE THREE BASIC FOOD GROUPS?
FROZEN... CANNED... AND TAKE-OUT!

Abb. 220.3

Die wichtigsten organischen Moleküle in Zellen sind

- **Fette** (*lipids*)
- **Kohlenhydrate** (*carbohydrates*)
- **Eiweißstoffe** (**Proteine**[1] – *proteins*) und
- **Nucleinsäuren** (*nucleic acids*)

Kohlenhydrate, Fette und Proteine werden zur Gruppe der **Hauptnährstoffe** (**Grundnährstoffe** – *main nutrients*) zusammengefasst. Sie liefern die zum Leben notwendige Energie. Außerdem gewinnt der Körper aus ihnen einfache Zellbausteine, die er für den Aufbau eigener Biomoleküle benötigt (zur Übersicht siehe **Abb. 221.1**).

Nicht-energieliefernde Nährstoffe sind z. B. Vitamine und Mineralstoffe.

[1] „protos" (griech.) = „erstes, wichtigstes"

Kohlenhydrate
Monosaccharide (z.B. Glucose)
Polysaccharide (z.B. Stärke)

Fette
Glycerin
Fettsäuren
Fett

Proteine
Aminosäuren
Protein

Nukleinsäuren
Base
Zucker
Phosphat
Nucleotide
Nukleinsäure

Abb. 221.1 *Übersicht über die wichtigsten Biomoleküle und ihre Bausteine*

Nährwerte und Nährstoffe

Kohlenhydrate
Fette
Eiweiß

Apfel, Banane, Bratwurst, Butter, Camembert, Champignon, Eier, Emmentaler, Erdbeere, Erdnuss, Forelle, Gerste, Gurke, Honig, Kartoffel, Kokosfett, Kuhmilch, Kürbiskerne, Leberkäse, Mais, Milchschokolade, Orange, Reis, Rindfleisch, Salami, Schmelzkäse, Schweinefleisch, Spinat, Thunfisch, Tomate, Topfen, Vollkornbrot, Walnuss, Weintraube, Weißbrot, Weizen, Zucker

kJ
1000 2000 3000 4000

Tab. 221.1 *Nährwert und Nährstoffe in einigen Lebensmitteln (jeweils 100g)*

Experiment

Diese Experimente kannst du mit Hilfe deines Lehrers/deiner Lehrerin selber durchführen.

1. **Nachweis von Stärke (Iod-Stärke-Reaktion)**
   Löse 0,5 g wasserlösliche Stärke in 50 ml Wasser und erhitze, bis die Lösung klar ist. Nach dem Abkühlen ist die Lösung gebrauchsfertig. Zur Herstellung des Reagenz löse 0,2 g Kaliumiodid und 0,1 g Iod in 30 ml Wasser (**Lugol'sche Lösung**).
   Tropfe ein wenig der Iod-Lösung zur Stärkelösung.
2. **Nachweis reduzierender Zucker wie Glucose, Fructose (Benedikt-Reaktion)** Achtung: Schutzbrille tragen!
   Bereite folgendes Reagenz:
   Lösung I: 17,3 g Natriumcitrat und 10 g Natriumcarbonat in 70 ml Wasser unter Erwärmen lösen.
   Lösung II: 1,72 g Kupfer(II)-sulfat in 20 ml Wasser lösen.
   Beide Lösungen gießt du zusammen, schüttelst und füllst auf 100 ml auf.
   Löse in 2 Reagenzgläsern je 1 Spatelspitze Glucose bzw. Fructose in 1 ml Wasser. Gib nun jeweils langsam 1 ml Benedict-Reagenz zu, schüttle und erwärme im Wasserbad, bis eine Verfärbung der Lösungen eintritt.
3. **Nachweis von Fett**
   Mische in einem Reagenzglas 2 ml Pflanzenöl und 2 ml Hexan.
   Gib einen Tropfen dieser Mischung auf ein Filterpapier und daneben einen Tropfen Hexan als Vergleich.
   Lass das Hexan verdunsten.
4. **Nachweis von Eiweiß (Biuret-Reaktion)**
   Vermische das Eiweiß eines rohen Hühnereis mit ca. 100 ml Wasser und rühre gut um.
   Filtriere nun die Mischung durch etwas Watte.
   Bereite drei Reagenzgläser vor:
   In das erste Glas gibst du 2 ml der Eiweiß-Lösung, in das zweite Glas 2 ml Milch und in das dritte Glas 2 ml Wasser (Vergleichslösung). Füge zu allen drei Proben 10 Tropfen 1%ige Kupfer(II)-sulfat-Lösung und vermische die Lösungen.
   Danach gibst du noch 1 ml einer 1-molaren Natronlauge dazu und schüttelst.

Beobachte und dokumentiere die Ergebnisse.

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du Zusammenhänge zwischen biochemisch wichtigen Molekülen und Lebensmitteln herstellen kannst.

Ü17.1 **a)** Die Pflanze produziert aus Glucose Stärke.
Dieser Vorgang ist ein ______________________ (katabolischer/anabolischer) Prozess.

b) Beim Abbau von Glycogen in menschlichen Muskelzellen entsteht Glucose.
Dieser Vorgang ist ein ______________________ (katabolischer/anabolischer) Prozess.

Ü17.2 Bei katabolischen Prozessen wird Energie ______________________ (gewonnen/verbraucht),
bei anabolischen Prozessen wird Energie ______________________ (gewonnen/verbraucht).

Ü17.3 Die folgende Tabelle gibt den Gehalt an Kohlenhydraten, Fett und Eiweiß verschiedener Lebensmittel A – F an:

Lebensmittel | Kohlenhydrate | Fette | Eiweiß
Anteile in g/100g
10 20 30 40 50
A
B
C
D
E
F

Ordne den Buchstaben A – F folgende Lebensmittel zu:

a) Eier
b) Weißbrot
c) Kartoffel (gekocht)
d) Fisch
e) Kartoffel (gebraten)
f) Schinken

Ü17.4 In einem biochemischen Labor wurden verschiedene Lebensmittel analysiert.
Welche Ergebnisse werden die Tests gebracht haben? Markiere einen positiven Test mit **+** und einen negativen Test mit **–**.

Probe	Ergebnis der Tests			
	Glucose	Stärke	Fett	Eiweiß
Apfel				
Banane				
Brot				
Milch				
Butter				
Fruchtjoghurt				

Ü17.5 *Name three foods you like, that are rich **a)** in carbohydrate, **b)** in fat.*

17.2 Kohlenhydrate *(carbohydrates)*

Monosaccharide *(monosaccharides)*

Die Monosaccharide sind die kleinsten Bausteine der Kohlenhydrate. Ihre allgemeine Summenformel ist $\mathbf{C_nH_{2n}O_n}$, also z. B. $C_6H_{12}O_6$.

Nach der Anzahl der Kohlenstoff-Atome spricht man von Triosen (3 C), Tetrosen (4 C), Pentosen (5 C), Hexosen (6 C) usw. Am häufigsten findet man **Pentosen** und **Hexosen**. Sie liegen meist als Ringe vor.

- **Pentosen** ($C_5H_{10}O_5$) – z. B. Ribose, Desoxyribose sind Bausteine der Nukleinsäuren.

Abb. 223.1 *Ribose (links), Desoxyribose*

- **Hexosen** ($C_6H_{12}O_6$) – z. B. Glucose, Fructose

Abb. 223.2 *von links nach rechts: α-Glucose, α-Galactose und β-Fructose*

Merk & Würdig

Monosaccharide sind die kleinsten Bausteine der Kohlenhydrate.

Ihre allgemeine Summenformel ist $\mathbf{C_nH_{2n}O_n}$.

Am häufigsten findet man **Pentosen** (5 C) und **Hexosen** (6 C).

Abb. 223.3 *Glucose in der α-Form (links) und β-Form (rechts)*

Disaccharide *(disaccharides)*

Disaccharide entstehen durch Verknüpfung von zwei Monosacchariden. Dies geschieht durch eine **Kondensationsreaktion** **(Seite 190)**.

HO–●–OH + HO–●–OH → HO–●–O–●–OH + H_2O

Monosaccharid Monosaccharid Disaccharid

Merk & Würdig

Disaccharide entstehen durch eine **Kondensationsreaktion** aus zwei Monosacchariden.

Disaccharid	besteht aus	Strukturformel
Maltose (Malzzucker) *(maltose)* Entsteht beim Abbau von Stärke Farblose Kristalle, leicht löslich in Wasser	α-Glucose + Glucose (α oder β)	
Cellobiose *(cellobiose)* Abbauprodukt der Cellulose **(Seite 224)**; Farblose Kristalle, leicht löslich in Wasser	α-Glucose + Glucose (α oder β)	
Lactose (Milchzucker) *(lactose)* Farblose Kristalle, leicht löslich in Wasser; schwach süßer Geschmack.	β-Galactose + Glucose (α oder β)	
Saccharose (Rohrzucker, Rübenzucker) *(sucrose)* Wichtigstes Disaccharid in Pflanzen	α-Glucose + β-Fructose	

Tab. 223.1

Merk & Würdig

Polysaccharide bestehen aus vielen miteinander verbundenen Monosacchariden.

Abb. 224.1 *Baumwollfasern bestehen aus Cellulose*

Polysaccharide *(polysaccharides)*

Polysaccharide sind natürliche Makromoleküle, die durch Kondensation von mindestens 10 bis zu Tausenden Monosaccharid-Molekülen entstehen. Die drei wichtigsten Polysaccharide sind:

- **Stärke** besteht aus bis zu 300 α-Glucose-Molekülen. Sie ist die Speicherform für Glucose in Pflanzen. Je nach Art der Stärke sind die Molekülketten verzweigt oder unverzweigt.
- **Glycogen** besitzt einen ähnlichen Aufbau wie Stärke. Die Molekülketten sind allerdings stärker verzweigt. Es ist die Speicherform für Glucose im menschlichen und tierischen Körper (vor allem in Leber- und Muskel-Zellen).
- **Cellulose** besteht aus bis zu 15 000 β-Glucose-Molekülen. Celluloseketten ordnen sich parallel zueinander an und formen so Fasern. Cellulose ist das Baumaterial pflanzlicher Zellwände.

Ergänzung & Ausblick

Stärke für Papier und Beton

Träge fließt im Stärkewerk der Agrana in Gmünd im Waldviertel die dickflüssige weiße Masse, die aus Kartoffeln gewonnen wurde, über eine große Trocknungstrommel, fällt in der Folge staubtrocken in dünnen Platten in einen Behälter darunter und wird dann zu Pulver verarbeitet. „Das ist das Ausgangsprodukt für rund 400 weitere Produkte“, sagt Josef Granner, Leiter der Abteilung Stärke bei Agrana.

Nur ein Teil davon findet sich in Lebensmitteln wie Trockensuppen, Teigmischungen, Backwaren oder Sirupen wieder. Ein Gutteil der Kartoffelstärke-Produktion findet in der Industrie Anwendung. In der Textilindustrie sorgt Stärke dafür, dass die Garne beim Weben leichter verarbeitet werden können. In Druckfarben wird sie als Verdickungsmittel eingesetzt, in der Papierindustrie zur Erhöhung der Papierfestigkeit, in der Wellpappeindustrie als Kleber und im Tunnelbau in Spritzbeton. In der Chemieindustrie ist Stärke als Rohstoff für Penizillin und Zitronensäure gefragt und als Trägersubstanz für Medikamente und Kosmetika. „Man schätzt die technischen Eigenschaften und die biologische Unbedenklichkeit“, sagt Granner.

Insgesamt 230.000 Tonnen Stärkekartoffeln verarbeitet Agrana derzeit in Gmünd zu rund 50.000 Tonnen Stärke. Dazu kommen 20.000 Tonnen Speisekartoffeln.

Übungen

Durch Beantwortung der folgenden Übungen beweist du, dass du Aufbau und Funktion biologisch wichtiger Moleküle kennst.

Ü17.6 Zwei oder mehrere Monosaccharide verbinden sich durch eine Kondensationsreaktion miteinander. Dabei wird Wasser abgespalten. Das Gegenteil dieser Reaktion ist die Hydrolyse. Sie kann z. B. mit Hilfe einer Säure (saure Hydrolyse) durchgeführt werden. Welche Monosaccharide entstehen bei der Hydrolyse von

a) Saccharose **b)** Cellulose **c)** Lactose **d)** Maltose

Ü17.7 **a)** Was sind die Summenformeln von einem Disaccharid bzw. Trisaccharid?

b) Gib die allgemeine Summenformel für ein Polysaccharid an, das aus Glucose-Einheiten besteht. Verwende das Symbol n für die Anzahl der Glucose-Moleküle.

Ü17.8 *Describe the difference in structure between starch and cellulose. How does this difference affect human nutrition?*

Ü17.9 Das neben der Cellulose am weitesten verbreitete Polysaccharid ist das Chitin. Wo kommt es vor und welche Funktionen besitzt es?

Ü17.10 Glucose ist der Energielieferant für die Zellen. Zu niedrige, wie auch zu hohe Glucose-Konzentrationen im Blut können gefährlich sein. Ein zu hoher Gehalt an Glucose kann infolge von Osmose (Band 2, Seite 17) zu Organschäden führen (z. B. die Netzhaut im Auge). Der Blutzuckergehalt wird daher im Organismus innerhalb enger Grenzen konstant gehalten.

a) innerhalb welcher Grenzen liegt der Glucosegehalt im Blut („Blutzuckerspiegel“) bei einem gesunden Jugendlichen (ohne vorherige Mahlzeit = „nüchtern“)?

b) welche Substanzen sind für die Regulierung des Blutzuckergehalts verantwortlich?

17.3 Lipide *(lipids)*

Lipide sind eine Gruppe biochemischer Verbindungen. Sie unterscheiden sich in ihrem Aufbau, werden aber wegen ihrer hydrophoben Eigenschaft zu einer Stoffgruppe zusammengefasst. Zu den Lipiden zählen z. B.:

- **Fette**
- **Phospholipide**
- **Steroide**

Fette *(fats, triglycerides)*

Fette sind Ester des dreiwertigen Alkohols Glycerin und drei Fettsäuren **(Seite 191)**. Man bezeichnet sie auch als „**Triglyceride**" bzw. „Neutralfette".

Abb. 225.1

Ergänzung & Ausblick

Meist sind in Fetten **ungesättigte** neben **gesättigten** Fettsäuren vorhanden. Mehrfach ungesättigte Fettsäuren wie Linol- oder Linolensäure, können im menschlichen und im Säugetierorganismus nicht synthetisiert werden. Sie sind daher lebensnotwendig. Solche Fettsäuren werden auch als **essentielle Fettsäuren** bezeichnet. Linol- und Linolensäure sind besonders reichlich in manchen pflanzlichen Ölen vorhanden. Noch höher ungesättigte Säuren kommen in Fischleberölen vor.

Eine Doppelbindung ist nicht frei um ihre Achse drehbar.
Daher gibt es zwei verschiedene Isomere, die **cis**[1]-Form und die **trans**-Form.

Abb. 225.2 *cis-2-Buten*

Abb. 225.3 *cis-Fettsäure*

Abb. 225.4 *trans-2-Buten*

Abb. 225.5 *trans-Fettsäure*

Natürliche Fette enthalten hauptsächlich cis-Fettsäuren. Durch die industrielle Behandlung von Fetten steigt der Gehalt an **trans-Fettsäuren** in der Nahrung. Sie werden als Mitverursacher von Herzerkrankungen (z. B. Arteriosklerose) angesehen.

Phospholipide *(phospholipids)*

Phospholipide, wie z. B. das **Lecithin** (Phosphatidylcholin), sind ähnlich aufgebaut wie Tenside **(Seite 195)**. Der hydrophobe Teil besteht aus zwei Fettsäuren. Die hydrophile Kopfgruppe leitet sich von der Phosphorsäure ab.

Abb. 225.6 *Lecithin*

Abb. 225.7 *Lecithin wird aus dem Öl der Sojabohne gewonnen*

[1] „cis" (lat.) = „diesseits"; „trans" (lat.) = „jenseits". Gemeint ist in Bezug auf die Doppelbindung

Ergänzung & Ausblick

Aufgrund ihrer hydrophoben und hydrophilen Eigenschaft können Phospholipide Schichten bilden **(Abb. 226.1)**. **Phospholipid-Doppelschichten** *(phospholipid bilayers)* sind die Hauptbestandteile der Membranen von Zellen und Zellorganellen (z. B. Mitochondrien) **(Abb. 239.3)**.

Zellmembran
Zellkern
Eiweiß

Abb. 226.1 *Schematische Darstellung des Aufbaus einer Zellmembran aus Phospholipiden*

Abb. 226.2 *elektronenmikroskopische Aufnahme von Lecithin-Multilayern (Vergrößerung: 342 000 x)*

Membranen regulieren den **Stoffaustausch** zwischen Zelle und Umgebung sowie zwischen den einzelnen Bereichen innerhalb einer Zelle. Dies geschieht durch

- **Diffusion** **(Band 2, Seite 16)** oder durch
- **Membrantransport**. Dabei sind die in der Membran eingelagerten Eiweißstoffe beteiligt **(Abb. 239.4)**.

Steroide *(steroids)*

Steroide sind Verbindungen, die den Kohlenwasserstoff **Steran** als Grundgerüst besitzen.

Abb. 226.3 *Steran*

Merk & Würdig

Steroide sind Derivate des Kohlenwasserstoffs **Steran**.

Steroid	Funktion	Strukturformel
Cholesterin *(cholesterol)*	Cholesterin wird in der Leber gebildet und kommt nur in tierischen Lebensmitteln (z. B. Fleisch, Eier, Butter) vor. Es wird im Körper an Proteine gebunden und in dieser Form im Blut transportiert (**LDL**, **HDL**[1)]). Es ist am Aufbau der Zellmembran beteiligt und ist Ausgangsstoff für die Bildung von Steroidhormonen.	H_3C, CH_3, CH_3, CH_3, H_3C, HO
Testosteron *(testosterone)*	Testosteron ist das männliche Sexualhormon. Es bewirkt die Ausbildung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale.	CH_3, OH, CH_3, O
Östrogen *(oestrogen)*	Östrogen ist das weibliche Sexualhormon. Es bewirkt die Ausbildung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale.	CH_3, O, CH_3, HO

Tab. 226.1

1) **LDL**: Low density lipoproteins, **HDL**: high denisty lipoproteins

Thema & Gesellschaft

Bioeier haben mehr Omega-3-Fettsäuren

Ein durchschnittliches Hühnerei hat etwa 80 Kilokalorien und enthält etwa acht Gramm Fett. Mehr als die Hälfte dieser Fettsäuren sind ein- bzw. mehrfach ungesättigt, das heißt: „gute" Fettsäuren. Hühnereier enthalten außerdem das Lipid Cholesterin, das wir für die Geschmeidigkeit unserer Zellwände brauchen, und die Mineralstoffe Kalzium, Phosphor, Eisen, Natrium, Zink, Kalium und Selen. Außerdem steckt das wertvolle B-Vitamin Folsäure im Hühnerei, ein essenzieller Nährstoff, den unser Körper zur Zellerneuerung benötigt. Hühnereier enthalten weiters alle Vitamine, außer Vitamin C. Das Eiweiß kann von unserem Körper zu 100 Prozent verwertet werden.

Kurzum: So ein Hühnerei ist gesund und kann bedenkenlos verspeist werden, solang man keine Probleme mit seinen Cholesterinwerten hat. Denn das Ei gehört neben den Innereien zu den cholesterinreichsten Lebensmitteln. Allerdings ist Ei nicht gleich Ei. Es gibt nicht nur Größenunterschiede, sondern auch eindeutige Qualitätsunterschiede. In Studien fand man heraus, dass Freiland- und Bioeier klare Gewinner sind. Sie haben mehr von Omega-3-Fettsäuren als Eier aus Bodenhaltung. Denn die Quelle von Omega-3-Fettsäuren sind Gräser und Kräuter und kleine Insekten, diese gesunde „Mischkost" ist aber nur im Freien zu finden.

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du die Struktur und Funktion von Lipiden kennst. Außerdem kannst du Zusammenhänge mit deinen Alltagserfahrungen herstellen.

Ü17.11 Im Folgenden siehst du die Strukturformeln von Ölsäure **(Abb. 227.1)** und Linolsäure **(Abb. 227.2)**: Ölsäure ist eine C 18 : 1-, Linolsäure ist eine C 18 : 2 Fettsäure. Was ist eine C 20 : 4 Fettsäure?

Abb. 227.1 *Ölsäure*

Abb. 227.2 *Linolsäure*

Ü17.12 Im Artikel „Thema & Gesellschaft" werden Omega-3-Fettsäuren erwähnt.

a) Was versteht man darunter?

b) Suche im Internet nach Beispielen für mehrfach ungesättigte Fettsäuren.

c) In welchen Nahrungsmitteln sind sie zu finden?

d) Welche Bedeutung haben sie für die menschliche Ernährung?

Ü17.13 Cholesterin ist in Wasser nicht löslich. Damit es trotzdem im Blut transportieren werden kann, wird es an Eiweißstoffe gebunden. Diese Verbindungen nennt man Lipoproteine. Dabei unterscheidet man LDL-Cholesterin und HDL-Cholesterin. Wie wirken sich HDL- und LDL-Cholesterin auf die Gesundheit aus?

Ü17.14 Was ist der wichtigste Rohstoff für Lecithin?

Ü17.15 ***a)*** *What is the difference between a saturated and an ansaturated fat?*

b) *Olive oil is said to be ‚rich in mono-unsaturated fats'. What do you understand by the term ‚mono-unsaturated'?*

Ü17.16 Beim Erhitzen eines Fetts mit Natronlauge scheidet sich nach einigen Minuten ein festes Endprodukt ab.

a) Erkläre, welche Reaktion abläuft.

b) Wie heißt das erwähnte Endprodukt, was ist das Nebenprodukt?

Ü17.17 Um Haltbarkeit, Geschmack und Aussehen von Lebensmitteln zu verbessern, verwendet man Zusatzstoffe. Diese Substanzen werden von der Europäischen Union zugelassen und erhalten eine E-Nummer.

a) In welche Gruppen können die Zusatzstoffe eingeteilt werden?

b) Was sind Antioxidantien?

c) ein Lebensmittel enthält die Zusatzstoffe E471, E450i und E304i, E330. Um welche Substanzen handelt es sich? Welche Funktion haben sie?

d) Suche bei den Zutaten verschiedener Lebensmittel nach Zusatzstoffen, die mit E-Nummern gekennzeichnet sind.

17.4 Proteine *(proteins)*

Abb. **228.1** *Modell von Hämoglobin aus 4 Untereinheiten*

Merk & Würdig

Aminosäuren sind Carbonsäuren mit einer zusätzlichen **Aminogruppe –NH$_2$**.

Proteine sind große und vielfach kompliziert gebaute natürliche Polymere. Das **Hämoglobin** der roten Blutkörperchen besitzt z. B. die Formel $C_{2952}H_{4664}O_{832}N_{812}S_8Fe_4$.

Die Proteine sind aus **Aminosäuren** aufgebaut. Proteine, die aus weniger als ca. 100 Aminosäuren bestehen, nennt man häufig auch **Peptide**.

Aminosäuren sind Carbonsäuren, die noch eine zusätzliche **Aminogruppe -NH$_2$** im Molekül enthalten.

Abb. 228.2 *allgemeine Strukturformel einer Aminosäure*

Abb. 228.3 *Modell der Aminosäure Alanin*

Die Aminosäuren unterscheiden sich durch ihren organischen Rest. Proteine bestehen aus 20 verschiedenen Aminosäuren.

Beispiel 17.1

Einige Aminosäuren und ihre Abkürzungen:

Glycin – Gly

Alanin – Ala

Valin – Val

Cystein – Cys

Asparaginsäure – Asp

Histidin – His

Abb. 228.4 *Durchschnittliche chemische Zusammensetzung eines Menschen*

Merk & Würdig

Amide entstehen durch die Reaktion einer **Carboxylgruppe** mit einer **Aminogruppe**.

Bei der Reaktion einer Aminogruppe mit einer Carboxylgruppe entsteht ein Amid. Die neue Bindung nennt man **Amidbindung**. Wie die Bildung eines Esters ist dies eine Kondensationsreaktion.

Aminosäuren werden ebenfalls durch eine Kondensationsreaktion miteinander verbunden. Dabei reagiert die Aminogruppe einer Aminosäure mit der Carboxylgruppe der nächsten Aminosäure. Die entstandene Amidbindung nennt man auch **Peptidbindung** (*peptide bond*).

Merk & Würdig

In Proteinen sind die Aminosäuren über **Peptidbindungen** miteinander verknüpft.

Abb. 229.1 *Tripeptid aus Glycin, Valin und Alanin (Gly-Val-Ala)*

Struktur der Proteine *(structure of proteins)*

- **Primärstruktur** (*primary structure*)
  Die **Primärstruktur** ist die Reihenfolge der Aminosäuren in der Proteinkette. An einem Ende der Aminosäurekette befindet sich eine NH_2-Gruppe (**N-terminales Ende**), am anderen Ende eine Carboxylgruppe (**C-terminales Ende**).
- **Sekundärstruktur** (*secondary structure*)
  Durch die Primärstruktur besitzt das Protein eine Art Rückgrat der Form -N-C-C-N-C-C- usw. mit unterschiedlichen Seitenketten.

  Die Kette ist beweglich und kann sich auf verschiedene Weise falten und verdrehen. Durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den NH- und CO-Gruppen werden einzelne Bereiche der Kette verbunden. Dadurch wird die Struktur fixiert. Dies nennt man **Sekundärstruktur** der Proteine. Man unterscheidet
  - **Faltblattstruktur** (*β-pleated sheet structure*). Dabei liegen Teile der Kette parallel aneinander.
  - **α-Helix** (*α-helix*). Dabei ist die Proteinkette zu einer Spirale verdreht.
- **Tertiärstruktur** (*tertiary structure*)
  Die Tertiärstruktur ist die tatsächliche räumliche Struktur eines Proteins. Sie kann sich aus verschiedenen Sekundärstrukturen zusammensetzen. Die Tertiärstruktur wird durch verschiedenartige Bindungen zwischen den Seitenketten R fixiert.
- **Quartärstruktur** (*quarternary structure*)
  Häufig besteht ein Protein aus zwei oder mehreren Polypeptidketten. Dann spricht man von der Quartärstruktur eines Proteins.

Primärstruktur
Faltblatt
α-Helix
Sekundärstruktur
Tertiärstruktur
Quartärstruktur

Abb. 229.2

Beispiel 17.2

Aufbau von Hämoglobin

Das menschliche **Hämoglobin** besteht aus 4 Proteinketten: zwei identische α-Ketten mit jeweils 141 Aminosäuren und zwei identische β-Ketten mit je 146 Aminosäuren. Insgesamt wird Hämoglobin daher auch als $\alpha_2\beta_2$ beschrieben. Jede Kette liegt zu etwa 70 % in der Form der α-Helix vor.

Jede der 4 Proteinketten ist an ein Nicht-Eiweiß, das **Häm** gebunden. Die 4 Häm-Gruppen tragen jeweils in ihrem Zentrum ein Fe^{2+}-Ion. Dieses bindet den Sauerstoff bzw. das Kohlenstoffdioxid im Blut. In Summe kann ein Hämoglobin gleichzeitig 4 Moleküle Sauerstoff transportieren.

Abb. 230.1 *Hämoglobin*

Abb. 230.2 *Häm-Gruppe*

Kohlenstoffmonoxid bindet etwa 325-mal stärker als Sauerstoff. Bei einer Kohlenstoffmonoxid-Konzentration von 0,1 % in der Atemluft wird bereits etwa 50% des Hämoglobins blockiert. Dadurch wird weniger Sauerstoff transportiert. Es kann zu einer inneren Erstickung der Zellen kommen.

Thema & Gesellschaft

Nanomaschinen am Computer erschaffen

Speziell präparierte Bausteine bilden nach Computermodellen Ketten, die von selbst, wie natürliche Eiweißstoffe, vorhersagbare Strukturen formen

Wien – Forscher der Universität Wien und der Universität für Bodenkultur (Boku) in Wien wollen winzige Maschinen konstruieren, die wie biologische Enzyme verschiedene Prozesse beschleunigen oder etwa Medikamente im Körper an den gewünschten Wirkungsort bringen. Sie haben nun in Computersimulationen gezeigt, dass man nanometerkleine, künstliche Bausteine so aneinanderreihen könnte, dass sie wie natürliche Eiweißstoffe Stränge und Knoten bilden. Auch die Form, die dabei herauskommt, ließe sich beeinflussen, indem man unterschiedliche Bausteine in der richtigen Reihenfolge anordnet, schreiben sie in der aktuellen Ausgabe der Fachzeitschrift „Physical Review Letters".

Abb. 230.3 *Knotenstruktur eines von den Wiener Forschern designten bionischen Proteins.*

Was die Forscher am Computer simuliert haben, wollen sie nun im Labor umsetzen: Speziell präparierte Nanopartikeln sollen in der passenden Reihenfolge zu Ketten verbunden werden, die sich daraufhin in die gewünschte Form falten, so wie natürliche Eiweißstoffe, erklärte Ivan Coluzza vom Bereich Computergestützte Physik an der Fakultät für Physik der Uni Wien. Die verwendeten Bausteine sind so klein, dass sie mit dem freien Auge nicht sichtbar sind und haben an der Oberfläche eine Andockstelle, mit denen sie sich aneinander binden können. Die Physiker nennen sie „Patchy Particles".

Funktioniert das Ganze, könne man damit zum Beispiel Nanomaschinen bauen, die Medikamente besser im Körper verteilen. Bringt man Medikamente nämlich in die Blutbahn, greift sie der Körper an und versucht sie zu zerstören, so wie alle fremden Stoffe, erklärte Coluzza. Mit speziell gebauten „Vehikeln" könnte man sie davor schützen, bis sie am Wirkungsort angekommen sind.

Die Berechnungen seien äußerst aufwendig und nur mit einem Hochleistungsrechner möglich gewesen, nämlich des „Vienna Scientific Clusters" (VSC), einem von der Universität Wien, der Technischen Universität Wien und der Universität für Bodenkultur Wien gemeinsam betriebenen Hochleistungsrechner, so die Forscher in einer Aussendung.

Denaturierung und Hydrolyse der Proteine

(denaturation and hydrolysis of proteins)

Experiment

Diese Experimente kannst du mit Hilfe deines Lehrers/deiner Lehrerin selber durchführen.
Achtung: Schutzbrille tragen!

Stelle zuerst die Eiweiß-Lösung her: Vermische das Eiweiß eines rohen Hühnereis mit ca. 100 ml Wasser und rühre gut um. Filtriere nun die Mischung durch etwas Watte.

Gib jeweils 4 ml der Eiweißlösung in 5 Reagenzgläser:

Reagenzglas 1: Erhitze die Lösung vorsichtig über der Bunsenbrennerflamme.

Reagenzglas 2: Gib 1 ml konzentrierte Salzsäure zu.

Reagenzglas 3: Gib 3 ml Alkohol (z. B. Ethanol, Propan-1-ol) zu.

Reagenzglas 4: Gib 3 ml Formaldehyd-Lösung zu.

Reagenzglas 5: Vergleich.

Notiere deine Beobachtungen in einigen kurzen Sätzen.

- **Denaturieren:** Beim Denaturieren verliert das Protein seine typische dreidimensionale Struktur. Dies kann verschiedene Ursachen haben, z. B.
  - Erhitzen (z. B. Kochen oder Braten von Eiern, Fleisch)
  - Verändern des pH-Werts (z. B. Gerinnen von saurer Milch)
  - Einfluss anderer Substanzen (z. B. Alkohol, Formaldehyd).
- **Hydrolyse:** Unter dem Einfluss von starken Säuren werden die Bindungen zwischen den einzelnen Aminosäuren aufgebrochen. Hydrolyse ist somit die Umkehrung der Kondensationsreaktion.

Abb. 231.1 *Eiweiß beginnt zu gerinnen*

Funktionen der Proteine *(function of proteins)*

Proteine spielen bei allen Lebensprozessen eine wichtige Rolle. Sie sind z. B.:

- **Strukturproteine** – Proteine bilden z. B. Muskel, Haut, Haare, Bindegewebe.
- **Transportmittel** – Hämoglobin transportiert z. B. Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid. Proteine sind am Transport von Substanzen durch Zellmembranen beteiligt.
- **Biokatalysatoren** – Alle Stoffwechselvorgänge in der Zelle werden von **Enzymen** **(Kapitel 18.1)** katalysiert.
- **Abwehrstoffe** – Antikörper besitzen eine wichtige Funktion bei der Abwehr von Krankheitserregern.
- **Regulatoren** – Insulin reguliert z. B. den Glucose-Gehalt im Blut.

Übungen

Mit folgenden Übungen zeigst du, dass du die Struktur und Eigenschaften von Proteinen kennst. Außerdem kannst du Zusammenhänge mit deinen Alltagserfahrungen herstellen.

Ü17.18 Was sind die beiden funktionellen Gruppen der Aminosäuren?

Ü17.19 Erkläre folgende Begriffe:

a) Tripeptid **b)** Polypeptid **c)** Protein

Ü17.20 Folgende Strukturformel zeigt ein Tetrapeptid.

a) Markiere die Peptidbindungen im Molekül.

b) Wie viele verschiedene Aminosäuren sind im Molekül miteinander verknüpft?

c) Gib die Reihenfolge der Aminosäuren mit den abgekürzten Namen an.
Beginne am N-terminalen Ende des Tetrapeptids.

Abb. 232.1 *Methyl ester of phenyalanine (Phe)*

Ü17.21 Die Peptidbindung ist eine:

☐ Ionenbindung
☐ Wasserstoffbrückenbindung
☐ Elektronenpaarbindung

Ü17.22 Die Sekundärstruktur eines Proteins wird fixiert durch:

☐ Ionenbindungen
☐ Wasserstoffbrückenbindungen
☐ Elektronenpaarbindungen

Ü17.23 Hämoglobin ist ein wichtiges Protein. Es transportiert Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid im Blut.

a) Aus wie vielen Polypeptidketten besteht das Molekül?

b) Aus wie vielen Aminosäuren besteht Hämoglobin?

c) Wie heißt die nicht-Eiweiß-Gruppe?

d) Wie viele dieser Gruppen sind im Hämoglobin vorhanden?

e) Welches Metall ist Teil der nicht-Eiweiß-Gruppe? Welche Ladung besitzt es?

Ü17.24 *Aspartame is an artificial sweetener which is 160 times sweeter than sucrose. It is a dipeptide of the amino acids aspartic acid (Asparaginsäure) and the methyl ester of phenylalanine. This also forms the C-terminal end. Draw the structure of aspartame.*

Abb. 232.2 *Methyl ester of phenylalanine (Phe)*

18

Stoffwechsel

In diesem Kapitel geht es um

- **Enzyme**
- **Energiestoffwechsel**
- **Proteinbiosynthese**
- **Klonen**

18.1 Enzyme *(enzymes)*

Jede einzelne Zelle funktioniert wie eine chemische Fabrik. Stoffe werden angeliefert, abgebaut, neue Substanzen werden synthetisiert und wieder abtransportiert. Damit alle Reaktionen des Stoffwechsels in der nötigen Geschwindigkeit ablaufen, sind Katalysatoren notwendig. In Zellen sind dies besondere Proteine, die **Enzyme**.

Merk & Würdig

Enzyme sind biologische Katalysatoren. Sie senken die Aktivierungsenergie für biochemische Reaktionen.

Wirkungen der Enzyme

- Jedes Enzym wirkt **sehr spezifisch** nur für eine bestimmte Substanz **(Substrat)**.
- Enzyme **beschleunigen biochemische Reaktionen**. Pro Zeiteinheit können dadurch mehr Moleküle des Substrats umgesetzt werden als ohne Enzym.
- Die Reaktionen laufen **unter milden Bedingungen** ab (z. B. geringe Temperatur, ohne Druck, bei pH ca. 7).
- Bei Enzym-katalysierten Reaktionen entstehen **keine unerwünschten Nebenprodukte**.

Durch die **Kontrolle der Enzyme** kann auch die Reaktion kontrolliert werden.

Aktivierungsenergie für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit verschiedenen Katalysatoren:

$$2\,H_2O_2 \rightarrow 2\,H_2O + O_2$$

Katalysator	kJ/
kein Katalysator	+75,3
Platin Katalysator	+ 48,9
Enzym Katalase	+ 23,0

Tabelle 234.1

Ergänzung & Ausblick

Enzyme kann man zu einzelnen Gruppen zusammenfassen. Dies geschieht hauptsächlich durch die katalysierte Reaktionsart. Diese Reaktion wird auch zur Benennung des Enzyms verwendet. Zusätzlich besitzen alle Enzyme die Namensendung „**-ase**".

Enzymart	Katalysierte Reaktion	Beispiel
Oxidoreductasen	Redox-Reaktion	Alkoholdehydrogenase
Transferasen	Übertragung von Gruppen (z. B. Phosphat-Gruppen)	Adenosintriphosphatasen
Hydrolasen	Aufspaltung von Molekülen durch Hydrolyse	Lipase, Amylase
Ligasen	Verknüpfung von Molekülen	Glycogensynthase
Lyase	Entfernung oder Addition einer Gruppe an eine Doppelbindung	Pyruvatdecarboxylase
Isomerase	Isomerisierung, Bewegung von Gruppen innerhalb eines Moleküls	Phosphoglucoseisomerase

Tabelle 234.2

Räumlicher Aufbau und Reaktivität der Enzyme
(enzyme shape and reactivity of enzymes)

Auf Grund der Tertiärstruktur besitzt das Enzym-Molekül eine ganz bestimmte Form. Es entstehen Bereiche, in welche nur das Substrat-Molekül passt, so wie nur ein Schlüssel zu einem Schloss passt (**Schlüssel-Schloss-Modell**). Dieser Bereich des Enzyms wird entsprechend auch **aktives Zentrum** (*active site*) bezeichnet. Meist besitzt jedes Enzym nur ein aktives Zentrum.

Enzym + Substrat → Enzym-Substrat

Abb. 234.1 *1.Schritt: Bildung des Enzym-Substrat-Komplexes*

Enzym-Substrat → Enzym + Produkte

Abb. 234.2 *2.Schritt: eigentliche Reaktion (z. B. Spaltung des Subtrates)*

Die durch das Enzym katalysierte Reaktion läuft in zwei Schritten ab:

1. Schritt: Bildung des **Enzym-Substrat-Komplexes** (Abb. 234.1)
Enzym + Substrat → Enzym-Substrat-Komplex

2. Schritt: Ablauf der **eigentlichen Reaktion** (Abb. 234.2)
Enzym-Substrat-Komplex → Enzym + Produkt(e)

Für die Bindung des Substrates und die Umsetzung des Substrates sind verschiedene Reste in der Enzymkette verantwortlich.

Experiment

Diese Experimente kannst du selber durchführen.

1. **Wirkung des Enzyms Invertase**

   Das Enzym Invertase spaltet Saccharose in Glucose und Fructose. Es ist in menschlichen und tierischen Zellen sowie in Pflanzen und Pilzen enthalten.

   Hefe-Suspension: Gib ca. 3 g Trockenhefe zu 20 ml dest. Wasser und lasse die Mischung etwa eine halbe Stunde stehen.

   Bereite 5 Reagenzgläser vor und befülle sie mit ca. 5 ml Saccharose-Lösung (ca. 8g/100 ml).
   Reagenzglas 1: gib 3ml Hefe-Suspension dazu und schüttle
   Reagenzglas 2: gib 3 ml dest. Wasser dazu und schüttle

   Nach ca. 10 Minuten entnimmst du von jedem Reagenzglas 2 ml und gibst sie in 2 neue Reagenzgläser.
   Reagenzglas 3: 2 ml Hefe-Suspension + Saccharose (von Reagenzglas 1)
   Reagenzglas 4: 2 ml Hefesuspension + Wasser (von Reagenzglas 2)
   Reagenzglas 5: 2 ml einer Glucose-Vergleichslösung (ca. 4 g/ 100 ml).

   Gib jetzt zu jedem der drei Reagenzgläser 10 Tropfen Benedict-Reagenz (siehe Experiment **Seite 221**) und erwärme die Lösungen im kochenden Wasserbad für etwa 3 Minuten.

   Notiere deine Beobachtungen.

2. **Wirkung des Enzyms Katalase**

   Das Enzym Katalase spaltet das für die Zellen gefährliche Wasserstoffperoxid H_2O_2 in Wasser und Sauerstoff **(Seite 234)**.

   Bereite 5 Reagenzgläser vor und befülle sie mit ca. 5 ml Wasserstoffperoxid-Lösung (3%-ig) und gib folgende Proben dazu:
   Reagenzglas 1: kleine Stückchen einer frisch geschnittenen Kartoffel
   Reagenzglas 2: ein kleines Stückchen frischer Leber
   Reagenzglas 3: eine kleine Menge Trockenhefe
   Reagenzglas 4: kleine Stückchen einer gekochten Kartoffel
   Reagenzglas 5: Vergleichslösung oder Zusatz

   Beobachte die Gasentwicklung in den Reagenzgläsern und notiere das Versuchsergebnis.

3. **Wirkung des Enzyms Pepsin**

   Das Enzym Pepsin spaltet bei stark saurem pH-Wert im Magen Eiweißstoffe.

   Bereite 4 Reagenzgläser 1-4 vor und gib jeweils ca. 5ml folgender Lösungen hinein:
   Reagenzglas 1: 1%-ige Pepsinlösung
   Reagenzglas 2: 1%-ige Pepsinlösung in 0,4% iger Salzsäure
   Reagenzglas 3: 0,4%-ige Salzsäure
   Reagenzglas 4: destilliertes Wasser

   Gib nun zu den 4 Reagenzgläsern jeweils gleich große, möglichst dünne Streifen von hart gekochtem Eiweiß und lass die Lösungen über Nacht stehen.

   Notiere deine Beobachtungen.

Beeinflussung der Enzym-Aktivität *(factors affecting enzyme activity)*

Die Aktivität eines Enzyms wird beeinflusst von:

- **Temperatur**
  Die Enzyme der meisten Organismen sind bei 65 °C denaturiert und daher oberhalb dieser Temperatur nicht mehr funktionsfähig **(Abb. 235.1)**.
- **pH-Wert**
  Bei hohen oder sehr niedrigen pH-Werten sind die Enzyme denaturiert. Geringe pH-Veränderungen können die Ladungen der Seitenketten im Enzym-Molekül beeinflussen und damit seine Reaktionsfähigkeit herabsetzen. Die meisten Enzyme brauchen einen bestimmten pH-Wert für optimale Funktion. z. B.:
  - **Pepsin** spaltet Eiweiß im Magen und benötigt einen sauren pH-Wert.
  - **Amylase** findet sich im Speichel und spaltet Stärke zu Maltose und Glucose.
  - **Trypsin** spaltet im Darm Proteine zu Aminosäuren.

Abb. 235.1 *Enzymaktivität in Abhängigkeit von der Temperatur*

Abb. 235.2 *Enzymaktivität in Abhängigkeit vom pH-Wert*

- **Konzentration**
  Sowohl die Konzentration des Enzyms als auch die des Substrates besitzen einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit.
- **Coenzyme**
  Viele Enzyme benötigen für ihre Aktivität Coenzyme. Das sind kleine organische Moleküle, die sich an ein Enzym binden und nach der Reaktion wieder abkoppeln. Sie nehmen während der Reaktion chemische Gruppen, Protonen oder Elektronen auf. Im Gegensatz zu Enzymen gehen Coenzyme verändert aus einer Reaktion hervor. Sie müssen vor der nächsten Reaktion wieder reaktiviert werden.

Coenzym
Substrat
Enzym

Abb. 236.1 *Funktionsweise eines Coenzyms*

Beispiel 18.1

Coenzym A (CoA)

Das Coenzym A ist u.a. am Energiestoffwechsel der Zelle beteiligt. Dabei überträgt es C_2-Gruppen. Ein mit dieser C_2-Gruppe beladenes Coenzym A wird **Acetyl-CoA** genannt.

Abb. 236.2 *Strukturformel von Coenzym A*

O
C — CoA
H_3C

Abb. 236.3 *Acetyl-CoA*

Merk & Würdig

Ein **Inhibitor** ist ein Stoff, der eine Reaktion verlangsamt oder gänzlich verhindert.

Biokybernetik ist die Wissenschaft, die sich mit Steuerungs- und Regelungsvorgängen in Organismen beschäftigt.

- **Inhibitoren**
  Die Enzymaktivität kann durch bestimmte Stoffe (**Inhibitoren**[1] – *inhibitor*) gehemmt werden. Dadurch werden biochemische Reaktionen den Bedürfnissen des Organismus angepasst. Solche Regelmechanismen sind Beispiele für **biokybernetische Prozesse**.

[1] „inhibere" (lat.) = „hemmen, unterbinden"

Ergänzung & Ausblick

- **Kompetitive[1] Hemmung** (*competitive inhibition*). Das aktive Zentrum des Enzyms wird durch Moleküle blockiert, die eine ähnliche Struktur wie das Substrat besitzen. Es kommt zu einer Konkurrenz zwischen Substrat und Inhibitor. Bei Anwesenheit eines kompetitiven Inhibitors ist eine höhere Konzentration des Substrates notwendig, um die maximale Geschwindigkeit zu erreichen.

  Beispiel:
  Histamin besetzt einen spezifischen Rezeptor und löst dadurch im Gewebe Entzündungsmerkmale wie z. B. Rötung, Schwellung und Schmerz aus. Antihistaminika besitzen eine ähnliche Struktur wie Histamin. Sie blockieren den Rezeptor, ohne selber Wirkungen zu verursachen.

Abb. 237.1 *Kompetitive Hemmung*

- **nicht kompetitive Hemmung** (*non-competitive inhibition*). Bei der nichtkompetitiven Hemmung werden die Moleküle des Inhibitors nicht an das aktive Zentrum des Enzyms gebunden, sondern an eine andere Stelle. Dadurch wird die räumliche Form des Enzyms so verändert, dass das Substrat nicht mehr an das aktive Zentrum gebunden werden kann. Je nach Konzentration des Inhibitors wird die maximale Reaktionsgeschwindigkeit erniedrigt.

  Beispiel:
  Nehmen wir an, ein Stoffwechselweg führt von einem Ausgangsstoff A über die Substanzen B und C zum Endprodukt D. Wenn der Bedarf an D sinkt, steigt seine Konzentration. Die Moleküle von D hemmen das erste Enzym in der Kette (und damit die Reaktion von A nach B). Dadurch wird weniger Endprodukt D gebildet.
  Wenn der Bedarf an Endprodukt wieder steigt, sinkt seine Konzentration. Das Molekül des Endproduktes hemmt das Enzym nicht mehr länger und die ursprüngliche Aktivität wird wieder hergestellt. Durch diesen Rückkopplungs-Mechanismus können Stoffwechselvorgänge rasch dem Bedarf angepasst werden.

Abb. 237.2 *Nicht-kompetitive Hemmung*

Abb. 237.3 *Rückkopplungs-Mechanismus*

Übungen

Mit der Beantwortung folgender Übungen beweist du, dass du grundlegende Kenntnisse über die Wirkung von Enzymen hast. Du kannst auch Zusammenhänge mit deinen Erfahrungen aus dem Alltag herstellen.

Ü18.1 Erkläre, warum ein Enzym spezifisch nur die Reaktion eines bestimmten Substrates katalysiert.

Ü18.2 Vollwaschmittel enthalten Enzyme, um vor allem Eiweißstoffe in kleine Bruchstücke zu zerlegen, die sich anschließend leichter von der Faser lösen lassen **(Kapitel Waschmittel)**. Bei welcher Temperatur werden sie wirksam sein?

a) unter 60 °C **b)** über 60 °C

Begründe deine Antwort.

Ü18.3 **a)** Erkläre den Rückkopplungsmechnismus bei einem Raumthermostat.

b) Nenne einige Beispiele für Regelungsmechanismen im menschlichen Organismus.

Ü18.4 Das nebenstehende Diagramm **(Abb. 237.4)** zeigt die Geschwindigkeit einer biochemischen Reaktion in Abhängigkeit von der Substratkonzentration

a) ohne Inhibitor

b) mit einem nicht-kompetitiven Inhibitor

c) mit einem kompetitiven Inhibitor.

Ordne **a)**, **b)** bzw. **c)** den Kurven 1-3 zu.

Abb. 237.4

Ü18.5 Betrachte die Strukturformel von Coenzym A **(Abb. 236.2)** und kreuze die richtige(n) Aussage(n) an:

- ☐ Coenzym A enthält das Monosaccharid Ribose und 3 Phosphat-Gruppen.
- ☐ Coenzym A enthält das Monossaccharid Desoxyribose.
- ☐ Coenzym A enthält die heterocyclische Verbindung Adenin.

[1] kompetitiv = im Wettbewerb stehend

Thema & Gesellschaft

Membran-Lipid steuert den Hauptschalter beim Zellwachstum

Forscher der Universität Jena entdecken neuen Regulations-Mechanismus, der auch beim Tumorwachstum eine Rolle spielt

Jena – Beim Wachstum und bei der Vermehrung von Zellen kommt dem Enzym Proteinkinase B eine zentrale Rolle zu. Das Protein übernimmt bei diesen Prozessen die Funktion eines Hauptschalters, indem es andere wichtige Enzyme jeweils „an-“ oder „ausschaltet“. Das Enzym ist allerdings nicht nur in gesunden Zellen aktiv. „Auch in Tumorzellen, die sich unkontrolliert vermehren, ist die Proteinkinase B maßgeblich am Wachstum beteiligt“, (…)

Membran-Lipid steuert den Hauptschalter

Demnach wird das Enzym von einem Bestandteil der Zellmembranen – einem Lipid-Molekül – direkt in seiner Aktivität beeinflusst. „Das Lipid hemmt die Wirkung der Proteinkinase B und unterdrückt damit das weitere Zellwachstum“, (…) Es handelt sich dabei um ein Speichermolekül der sogenannten Arachidonsäure, die wiederum eine wichtige Funktion bei der Entstehung von Entzündungen spielt.

Abb. 238.1

Abb. 238.2 *Speicherung chemischer Energie*

Abb. 238.5 *Energiespeicher ATP, ADP und AMP*

18.2 Energiestoffwechsel *(energy metabolism)*

Bei der Verdauung werden die Nährstoffe in kleinere Bausteine zerlegt:

- Kohlenhydrate in Monosaccharide (hauptsächlich **Glucose**),
- Fette in **Glycerin** und **Fettsäuren**,
- Proteine in **Aminosäuren**.

Die Bausteine werden über das Blut zu den einzelnen Zellen transportiert. Kohlenhydrate und Fette sind in erster Linie **Brennstoffe** für die Zelle. Aus ihnen gewinnt die Zelle Energie. Aminosäuren werden hauptsächlich als **Bausteine** für die Synthese eigener Proteine verwendet.

Die Brennstoffe können auf zwei Arten abgebaut werden:

- **aerob** (mit Hilfe von Sauerstoff) – z. B. Atmung
- **anaerob** (ohne Sauerstoff) – z. B. alkoholische Gärung in der Hefezelle.

Der Energiespeicher ATP

Die beim Abbau von Nährstoffen frei werdende Energie wird als **chemische Energie gespeichert**. In dieser Form steht sie später wieder für Energie verbrauchende Prozesse zur Verfügung.

Das wichtigste Speichermolekül für Energie ist das **Adenosintriphosphat**.

Abb. 238.3 *Strukturformel von ATP*

Abb. 238.4 *3D-Modell von ATP*

Bei der Bindung von anorganischem Phosphat an ADP wird Energie verbraucht. Diese ist im Molekül gespeichert und wird bei der Spaltung von ATP wieder zur Verfügung gestellt.

Die Wasserstoffspeicher NAD und FAD

Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid (NAD) ist ein **Coenzym**. Es wirkt als Überträger von Wasserstoff und Elektronen. NAD ist an vielen Redoxreaktionen des Stoffwechsels der Zelle beteiligt. Die oxidierte Form bezeichnet man **NAD^+**, die reduzierte Form **NADH**.

Reduktion

Oxidation

Abb. 239.1

$$NAD^+ + H^+ + 2e^- \rightleftharpoons NADH$$

Abb. 239.2 *Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid (oxidierte Form)*

Flavin-Adenin-Dinukleotid wirkt ebenfalls als Überträger von Wasserstoff und Elektronen. Dabei ist **FAD** die oxidierte, **$FADH_2$** die reduzierte Form.

Aerober Abbau von Glucose – Zellatmung

(aerobic conversion of glucose – cellular respiration)

Beim aeroben Abbau der Glucose entstehen Kohlenstoffdioxid, Wasser und Energie.

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{Energie}$$

Diese Reaktionsgleichung ist aber nur die Summe vieler Reaktionen, die an verschiedenen Stellen der Zelle stattfinden.

1. Schritt: Glycolyse *(glycolysis)*

Zuerst wird Im Zellplasma in mehreren Reaktionsschritten ein Molekül Glucose in zwei Moleküle **Pyruvat**[1] gespalten. Dabei entstehen 2 Moleküle ATP und 2 Moleküle NADH.

$C_6H_{12}O_6$ Glucose → (ADP + Phosphat → ATP; NAD^+ → NADH; ADP + Phosphat → ATP; NAD^+ → NADH) → 2 Pyruvat + $2\ H^+$ + $2\ H_2O$

2. Schritt: Bildung von Acetyl-CoA *(formation of acetyl-CoA)*

Die Pyruvat-Moleküle werden in die **Mitochondrien** („Kraftwerke der Zelle") transportiert. Dafür ist Energie in Form von ATP notwendig **(Abb. 239.3)**. In den Mitochondrien reagiert Pyruvat mit Coenzym A zu **Acetyl-CoA** **(Beispiel 18.1)**. Durch **Decarboxylierung** wird 1 Molekül Kohlenstoffdioxid abgespalten. Die Wasserstoff-Atome werden wieder auf NAD^+ übertragen.

$$\text{Pyruvat} + \text{CoA} + NAD^+ \rightarrow \text{Acetyl} - \text{CoA} + CO_2 + \text{NADH}$$

Abb. 239.4 *Membrantransport durch Proteinkanäle und Carrier-Proteine.*

Abb. 239.3 *Vereinfachte Darstellung einer menschlichen Zelle. Die Mitochondrien dienen der Zellatmung.*

Auch beim Abbau von Fettsäuren entsteht Acetyl-CoA.

[1] Pyruvat ist das Anion der Brenztraubensäure

Abb. 240.1 *schematische Darstellung von Glycolyse und Citratzyklus*

3. Schritt: Citratzyklus *(citric acid cycle)*

Zu Beginn des Citratzyklus überträgt Acetyl-CoA seine Acetyl-Gruppe auf Oxalacetat (4 C-Atome). Dabei entsteht Citrat (6 C-Atome). Dieses wird nun in mehreren Schritten abgebaut, bis schließlich wieder Oxalacetat vorliegt und der Kreislauf von neuem beginnt. Insgesamt werden dabei pro Molekül Acetyl-CoA (bzw. Pyruvat) 2 Moleküle CO_2 produziert. Der Wasserstoff wird als 3 NADH bzw. 1 $FADH_2$ zwischengespeichert **(Abb. 240.5)**.

Oxalacetat das Salz der Oxalessigsäure, Citrat ist das Salz der Citronensäure.

Abb. 240.2 *Oxalessigsäure* **Abb. 240.3** *Citronensäure*

4. Schritt: Atmungskette *(respiratory chain)*

Die Atmungskette läuft an der inneren Mitochondrienmembran ab. Hier wird der in NADH bzw. $FADH_2$ gespeicherte Wasserstoff in mehreren Schritten auf den eingeatmeten Sauerstoff übertragen. Dabei entsteht Wasser und ATP. NAD^+ und FAD werden wieder frei und stehen für weitere Speicherung von Wasserstoff zur Verfügung.

Ergänzung & Ausblick

Energiebilanz der Zellatmung

Jedes Molekül NADH liefert in der Atmungskette 3 ATP, jedes Molekül $FADH_2$ 2 ATP.

Vorgang	Energiereiche Substanzen	ATP
Glycolyse	2 ATP 2 NADH	2 ATP 6 ATP
Umwandlung von Pyruvat-zu Acetyl-CoA	2 NADH	6 ATP
Citratzyklus	2 ATP 6 NADH 2 $FADH_2$	2 ATP 18 ATP 4 ATP
Energie für Transport von Pyruvat durch die Mitochondrienmembran	– 2ATP	– 2ATP

Tabelle 240.1 *(alle Werte sind bezogen auf 1 Molekül Glucose)*

Abb. 240.5

Abb. 240.4 *Muskelarbeit benötigt ATP*

36 Moleküle ATP entsprechen

36*33,5 = 1 206 kJ/Mol Glucose.

Die direkte Verbrennung von 1 Mol Glucose liefert 2 872 kJ. Der Wirkungsgrad in den Zellen beträgt daher etwa 40 %, d. h. es können etwa 40 % der Gesamtenergie der Glucose als Energie in Form von ATP genützt werden. Der Rest dient zur Erhaltung der Körperwärme.

Thema & Gesellschaft

Neues Licht auf das Körperkraftwerk

Mehr Mitochondrien bedeuten mehr Leistung. Spitzensportler haben diese Gleichung bereits für sich genutzt. Nun soll auch die Altersforschung davon profitieren.

Die menschlichen Zellen haben eigene Kleinkraftwerke – die Mitochondrien. Dafür interessieren sich normalerweise Sportmediziner. Sie messen deren Sauerstoffverbrauch beim Verbrennen von Nährstoffen, um so zu erfahren, wie viel Energie in den Zellen produziert wird.

Wie verlässlich die Mitochondrien als körpereigene Energieversorger sind, rückt aber immer stärker ins Zentrum der gesamten medizinischen Forschung. Ist die Leistung dieser Kraftwerke gering, steigt beim Menschen offensichtlich die Anfälligkeit für unterschiedliche Risiken. Zusammenhänge zwischen der Zellatmung – also der Aktivität der Mitochondrien – und dem Auftreten von chronischen Entzündungen wurden ebenso bereits festgestellt wie ein Versagen der Immunabwehr.

Besonders wertvoll könnten neue Erkenntnisse über die Mitochondrienfunktion zudem für die Altersforschung sein: Degenerative Krankheiten wie Parkinson und Alzheimer, aber ebenso Typ-2-Diabetes, werden mit Vorgängen bei der Zellatmung in Verbindung gebracht. „Ob diese Krankheitsbilder tatsächlich die Folgeerscheinungen einer zu geringen Mitochondrienleistung sind, oder ob es sich umgekehrt verhält, kann aber derzeit noch nicht beurteilt werden", erklärt Erich Gnaiger von der Medizinischen Universität Innsbruck.

Eine von Gnaiger geleitete Arbeitsgruppe (…) widmet sich dieser Aufgabe seit langer Zeit. Vor rund 20 Jahren entstand ein Gerät zur Messung der Zellatmung. Dieser Oxygraph misst (…) die Sauerstoffmenge, die Mitochondrien benötigen, um etwa aus Kohlehydraten und Fettsäuren Energie zu erzeugen. Gespeichert wird der Antrieb für die Zellen als chemische Verbindung – das sogenannte Adenosintriphosphat (ATP).

Hinzu kam nun erst vor kurzem eine zweite Messmethode. Dabei werden fluoreszierende Farbstoffe eingesetzt. Sichtbar wird dadurch etwa die Bildung der Sauerstoffradikale, deren Rolle im Alterungsprozess es noch zu klären gilt.

Übungen

Mit folgenden Übungen beweist du deine Kenntnisse über den Stoffwechsel und Energiegewinnung der Zelle. Außerdem kannst du dir Informationen aus anderen Medien beschaffen.

Ü18.6 Suche im Internet oder anderen Medien die Strukturformel von FAD.
Zeichne die Strukturformel der Flavin-Gruppe in reduzierter und oxidierter Form.

Ü18.7 Bei Sportlern wird häufig der Gehalt an Lactat im Blut gemessen.

a) Was ist Lactat?

b) Unter welchen Bedingungen entsteht Lactat im Muskel?

c) Welchen Sinn haben Lactat-Tests?

Ü18.8 Sauerstoff wird eingeatmet und mit Hilfe von Hämoglobin im Blut zu den Zellen transportiert. In der Atmungskette reagiert er mit dem Wasserstoff von NADH bzw. $FADH_2$. Warum erfolgt diese Reaktion in mehreren kleinen Teilschritten?
(**Tipp:** Welche Reaktion läuft bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff ab?)

Ü18.9 Fette werden zu Fettsäuren und Glycerin zerlegt. Glycerin wird zu Pyruvat umgewandelt. Die Fettsäuren werden in einem eigenen Stoffkreislauf (**β-Oxidation der Fettsäuren**) zu C2-Einheiten zerlegt. Diese werden wieder auf Coenzym A übertragen, wobei Acetyl-CoA entsteht.

a) An welcher Stelle mündet also der Abbau der Fettsäuren in den Abbau der Glucose ein?

b) Wie viele Moleküle Acetyl-CoA entstehen bei der vollständigen Oxidation eines Moleküls Stearinsäure?

c) Wenn alle Moleküle Acetyl-CoA von Frage a) in den Citratzyklus eingeschleust werden, wie viele Moleküle ATP entstehen dann insgesamt (einschließlich Atmungskette) aus einem Molekül Stearinsäure?

Abb. 242.1

Abb. 242.2 *Chloroplasten*

Abb. 242.3 *Modell eines Chloroplasten*

Photosynthese *(photosynthesis)*

Die Photosynthese läuft in den **Chloroplasten** ab. Dabei unterscheidet man zwei Teilreaktionen:

- **Lichtreaktion** *(light-dependent reaction)*
  Licht spaltet mit Hilfe von Chlorophyll Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff (**Photolyse von Wasser**). Der Sauerstoff wird abgegeben, der Wasserstoff auf das **Coenzym NADP** (Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid-Phosphat) übertragen. Zusätzlich entsteht **ATP**.
- **Dunkelreaktion** *(light-independent reaction)*
  In einem Kreislauf, ähnlich dem Citratzyklus, wird Kohlenstoffdioxid aufgenommen. Es entstehen zwei C_3-Moleküle, aus denen Glucose aufgebaut wird. Für diesen Vorgang sind NADPH sowie ATP notwendig. Die Dunkelreaktion verläuft getrennt von der Lichtreaktion und benötigt keine Zufuhr von Licht.

Als Summe der beiden Teilreaktionen ergibt sich folgende Reaktionsgleichung:

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O \xrightarrow{\text{Licht, Chlorophyll}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O$$

bzw. als Netto-Reaktionsgleichung:

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \xrightarrow{\text{Licht, Chlorophyll}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

Abb. 242.4 *Schema der Photosynthese*

Thema & Gesellschaft

Protein für produktivere Photosynthese entdeckt

Rotalgen verfügen im Vergleich zu Grünpflanzen über effizienteren Mechanismus – Fund könnte zu Pflanzen führen, die mehr CO_2 in Biomasse umwandeln

Pflanzen, Algen und Plankton wandeln Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser in Sauerstoff und Zucker um. Ohne diesen Prozess wäre das heutige Leben undenkbar. Somit ist das Schlüsselprotein der Photosynthese, das Forscher kurz Rubisco nennen, eines der wichtigsten Proteine überhaupt. Es bindet CO_2 und leitet die Umwandlung in Zucker und Sauerstoff ein.

Ein Problem ist, dass Rubisco falsche Zuckermoleküle bindet, die dann seine Aktivität hemmen. Damit Rubisco seine Arbeit wieder aufnehmen kann, müssen die Zuckermoleküle von einem speziellen Helferprotein (Rubisco Aktivase) entfernt werden.

Die neu entdeckte Rubisco Aktivase in Rotalgen repariert blockierte Rubisco-Proteine, in dem sie an einem Ende des Proteins zieht – wie jemand, der an einem Schnürsenkel zieht. Dadurch öffnet das Helferprotein das aktive Zentrum von Rubisco und setzt so den Zucker frei. Die entsprechende Rubisco Aktivase in Grünpflanzen funktioniert dagegen eher wie ein Eieröffner: Sie quetscht das inaktive Rubisco-Protein und zwingt es so, die Zuckermoleküle frei zu lassen. „Das Verständnis der Struktur und Funktion der beiden Helferproteine könnte helfen Pflanzen und Mikroorganismen herzustellen, die effektiver arbeiten und somit mehr CO_2 in Biomasse umwandeln.

Übungen

Mit folgenden Übungen beweist du deine Kenntnisse über Struktur und Funktion biologisch wichtiger Moleküle. Du verstehst biochemische Experimente und kannst sie auswerten.

Ü18.10 Vergleiche die Strukturformeln von NAD und NADP. Was ist der Unterschied?

Ü18.11 *Students wanted to investigate photosynthesis and used the apparatus below to measure production of oxygen. They obtained following results:*

Abb. 243.1

Light intensity (arbitrary units)	oxygen released (mm^3/min)
1	7
2	14
3	21
4	28
5	34
6	39
7	42
8	44
9	45
10	45

Tabelle 243.1

Abb. 243.2

a) *Plot this information in the form of a graph.*

b) *At what light intensity did the plant produce 25 mm^3 per minute?*

18.3 Proteinbiosynthese *(protein synthesis)*

Proteine stehen im Mittelpunkt aller biochemischen Prozesse **(Seite 250)**. Daher sind ihre Baupläne in den Chromosomen festgelegt.

Der Mensch besitzt im Zellkern 46 **Chromosomen** **(Abb. 243.3)**. Jedes Chromosom ist aus **DNA-Fäden** aufgebaut **(Abb. 243.3 rechts)**. Die DNA ist ein Makromolekül. Ihre Bausteine sind die **Nucleotide**.

Abb. 243.3 *Menschliche Chromosomen*
rechts *Ein Chromosom besteht aus DNA-Fäden*

Desoxyribonucleinsäure *(desoxyribonucleic acid – DNA)*

Nucleotide bestehen aus **(Abb. 243.4)**:

- einem Molekül **Desoxyribose** (Pentose),
- einer **Phosphat-Gruppe** und
- einer stickstoffhaltigen **organischen Base**. In der DNA kommen vier verschiedene Basen vor:

Adenin *Cytosin* *Guanin* *Thymin*

Phosphat Desoxyribose Base (Thymin)

Abb. 243.4 *Nucleotid mit der Base Thymin*

Abb. 243.5 *DNA-Strang*

Durch **Kondensation der Nucleotide** entsteht ein **DNA-Strang** **(Abb. 243.5)**.

Jedes DNA-Molekül besteht aus einem **Doppelstrang**. Dieser wird durch Wasserstoffbrücken zwischen den organischen Basen zusammengehalten. Dabei verbindet sich immer Thymin (T) mit Adenin (A) und Cytosin (C) mit Guanin (G). Man spricht daher auch von den **komplementären Basenpaaren** Thymin/Adenin und Cytosin/Guanin.

Abb. 244.1 *DNA-Doppelstrang*

Abb. 244.2 *komplementäres Basenpaar Thymin/Adenin*

Abb. 244.3 *komplementäres Basenpaar Cytosin/Guanin*

Merk & Würdig

Ein **DNA-Molekül** bildet einen Doppelstrang, der zu einer α-Helix verdreht ist.

Jeder Strang ist ein Polymer aus **Nucleotiden**.

Jedes Nucleotid besteht aus **Desoxyribose**, einer **Phosphatgruppe** und einer von 4 verschiedenen **organischen Basen**.

Der Doppelstrang ist zu einer **α-Helix** gefaltet **(Abb. 244.4)**.

Abb. 244.4 *DNA-Doppelhelix*

Das größte Chromosom des Menschen wird als Chromosom 1 bezeichnet. Es besteht aus ca. $2{,}47 \cdot 10^8$ Basenpaaren.

Replikation *(replication)*

Replikation ist die **Verdoppelung der DNA** im Zuge einer Zellteilung. Die Reaktion wird katalysiert durch das Enzym **DNA-Polymerase**. Dazu ist chemische Energie erforderlich. Unter dem Einfluss des Enzyms werden die Wasserstoffbrücken zwischen den Basen des alten Doppelstrangs aufgebrochen und neue Nucleotide angelagert **(Abb. 244.5)**. Der neue Doppelstrang besteht somit jeweils aus einem alten und einem neuen Einzelstrang (semikonservatives[1] Prinzip)

Abb. 244.5 *Schema der Replikation*

Merk & Würdig

Replikation ist die Verdoppelung der DNA vor einer Kernteilung.

Merk & Würdig

DNA	RNA
Desoxyribose	Ribose
Adenin, Cytosin, Guanin, Thymin	Adenin, Cytosin, Guanin, Uracil
Doppelstrang	Einstrang

Ribonucleinsäure *(ribonucleic acid – RNA)*

Ribonucleinsäuren unterscheiden sich von Desoxyribonucleinsäuren in ihrer Struktur durch drei Merkmale:

- sie enthalten den Zucker **Ribose**,
- statt der Base Thymin enthalten sie die Base **Uracil**. Uracil (Formel siehe **Seite 246**) ist zu Adenin komplementär.
- Die Ribonucleinsäure besteht **nur aus einem Strang**.

[1] „semi" (lat.) = „halb"; „conservare" (lat.) = „erhalten"

Ribonucleinsäuren haben wichtige Funktionen bei der Proteinbiosynthese.

Transkription[1] *(transcription)*

Proteine werden in den **Ribosomen** gebildet. Das sind Zellorganellen, die sich im Zellplasma befinden. Der Bauplan für die Proteine muss also von der DNA im Zellkern zu den Ribosomen gebracht werden. Diese Aufgabe erfüllt eine bestimmte Ribonucleinsäure, die **messenger-Ribonucleinsäure (m-RNA)**.

Die Transkription verläuft ähnlich wie die Replikation: Zuerst werden die DNA-Stränge getrennt. Dann wird von einem DNA-Strang eine RNA-Kopie angefertigt. Alle Reaktionen werden wieder von Enzymen katalysiert und benötigen chemische Energie.

Abb. 245.1 *Transkription*

Merk & Würdig

Transkription ist das Kopieren der DNA auf eine RNA.

Genetischer Code *(genetic code)*

Die DNA bzw. die m-RNA enthalten die Information für den Aufbau der Proteine. Die Reihenfolge der Aminosäuren (Primärstruktur der Proteine – Seite 229) ist durch die Reihenfolge der Basen in der DNA festgelegt.

Ergänzung & Ausblick

Es gibt nur 4 verschiedene Basen, aber 20 verschiedene Aminosäuren. Eine Aminosäure muss daher durch Gruppen von Basen verschlüsselt (codiert) sein.

Bei Gruppen von 2 Basen (z. B. AA, AC, AG, AT, …) gibt es $4^2 = 16$ Kombinationen, also zu wenig für 20 Aminosäuren.
Bei Gruppen von 3 Basen (z. B. AAA, AAC, …) gibt es $4^3 = 64$ Kombinationen.

Jede Aminosäure ist daher durch ein **Basentriplett (Codon)** in der DNA bzw. m-RNA verschlüsselt. Manche Aminosäuren werden durch unterschiedliche Tripletts verschlüsselt.

Beispiel (Abb. 245.2):
Die Aminosäure Alanin (Ala) wird durch folgende Basentripletts codiert:
GCG, GCA, GCC und GCU.

Jedes Polypeptid bzw. Protein besitzt eine bestimmte Reigenfolge der Aminosäuren und damit eine bestimmt Länge. Innerhalb der langen Kette der m-RNA sind Beginn und Ende eines Proteins immer mit einem Start- bzw. Stopp-Codon festgelegt.

Abb. 245.2 *Codierung der Aminosäuren durch Basentripletts (von innen nach außen)*

Merk & Würdig

Translation ist die Biosynthese der Proteine an den Ribosomen.

Translation *(translation)*

Die Translation ist die Biosynthese der Proteine an den Ribosomen. Die Aminosäuren werden mit Hilfe der **transfer-RNA (t-RNA)** transportiert. An einem Ende der t-RNA befindet sich eine bestimmte Aminosäure, an einer anderen Stelle das **Anticodon**. Das

Abb. 245.3 *Von der DNA zum Protein*

Abb. 245.4 *Vorgänge bei der Translation*

Abb. 245.5 *Ribosomen am endo-plasmatischen Retikulum*

[1] „transcribere" (lat.) = „überschreiben"

Übungen

Mit diesen Übungen beweist du deine Kenntnisse von biologischen Molekülen und ihren Aufbau zu größeren Einheiten. Du verstehst die Prinzipien der Informationsweitergabe auf biochemischem Weg.

Ü18.12 *The diagram on the right represents the basic chemical unit from which the nucleic acids DNA and RNA are formed.*

a) *What is the name of the whole chemical unit shown?*

b) *State the names of the components labelled A and B.*

c) *What are the components labelled C in DNA/RNA?*

A
B
C

Abb. 246.1

Ü18.13 Die organischen Basen in der DNA und RNA sind heterocyclische Verbindungen. Was sind die heterocyclischen Kohlenwasserstoffe, die das Grundgerüst bilden für

a) Cytosin, Thymin (bzw. Uracil)

b) Adenin, Guanin?

Abb. 246.2 *Uracil*

Ü18.14 Die Doppelstränge der DNA werden durch __________________ (Ionenbindungen, Wasserstoffbrückenbindungen, Elektronenpaarbindungen) zusammengehalten.

Ü18.15 Ein wichtiges Enzym für die Replikation ist die DNA-Polymerase. Welches Enzym katalysiert (neben vielen anderen) die Bildung der RNA bei der Transkription?

Ü18.16 In der folgenden Tabelle sind drei Aminosäuren und ihre RNA-Codons dargestellt:

a) Schreib die Basensequenz der m-RNA an, mit der das Tripeptid Pro-Glu-Val codiert wird.

b) Wie war die Basensequenz des DNA-Strangs, von dem die m-RNA transkribiert wurde?

RNA codon	Aminosäure
GUA	Valin (Val)
CCU	Prolin (Pro)
GAA	Glutaminsäure (Glu)

Tab. 246.1

Ü18.17 Die folgende Aminosäuresequenz ist ein Ausschnitt aus einem Protein:
– Tyr – Ser – Ala – Ala – Glu – Gly – Ala – Val –

Dieses Protein wird durch eine Basenreihenfolge codiert, von der man ebenfalls einen Ausschnitt kennt:
… GUUACUCUGCUGCUGAAGGAGCUGUAC …

a) Stammt die Basensequenz von einer DNA oder RNA? Begründe deine Antwort.

b) Bestimme die Codons für Tyrosin und Alanin

Ergänzung & Ausblick

Der größte Teil der DNA aller Menschen ähnelt sich. Das ist der Teil, der die Erbinformationen trägt (**codierende DNA**). Außerhalb der eigentlichen Gene befinden sich Bereiche, die keine genetische Information enthalten. Man nennt sie **nichtcodierende DNA**.

Abb. 246.3 *VNTR Muster von 6 Personen*

Innerhalb der nichtcodierenden DNA liegen wieder Abschnitte, in denen sich bestimmten Basen-Reihenfolgen wiederholen (z. B. TACTAC). Diese nennt man **Tandems**. Je nach Länge nennt man sie **Short Tandem Repeats (STR)** oder **Variable Number Tandem Repeats (VNTR)**. Die STR besitzen höchstens 7 Basen pro Einheit, bei den VNTR sind es zwischen 10 bis 150 Basenpaare pro Einheit. Die Anzahl der Wiederholungen dieser Tandems ist unterschiedlich und typisch für einen bestimmten Menschen. Wenn man in mehreren Bereichen der nichtcodierenden DNA das Muster der Tandems untersucht, erhält man ein genetisches Profil für die Person (**genetischen Fingerabdruck** – *genetic fingerprint*) – **Abb. 246.3**.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei zwei nicht verwandten Menschen das Muster von STR und VNTR identisch ist, liegt bei etwa $4 \cdot 10^{-11}$. Je näher zwei Personen miteinander verwandt sind, umso ähnlicher ist das Muster. Die DNA-Analyse wird heute routinemäßig z. B. in der Kriminaltechnik oder bei Vaterschaftstest verwendet.

Bei der DNA-Analyse werden zuerst mit Hilfe bestimmter Enzyme (**Restriktionsenzyme**) die STR- und VNTR-Sequenzen aus der DNA herausgeschnitten und vermehrt. Anschließend werden sie in einer Gelschicht mit Hilfe von Strom aufgetrennt (**Gelelektrophorese**). Das Gel wirkt wie ein feines Sieb. Die Tandems sind negativ geladen. Je nach Größe wandern sie unterschiedlich rasch und werden auf ihrem Weg zur Anode (+Pol) voneinander getrennt **(Abb. 246.4)**.

Abb. 246.4 *Elektrophoreseapparatur*

Thema & Gesellschaft

Forscher entwickeln „Nanoroboter", der gezielt Krebszellen angreift

Washington – US-Forscher haben eine Art „Nanoroboter" aus DNA entwickelt, der gezielt Krebszellen angreifen kann. Der Miniaturtransporter nach dem Vorbild der körpereigenen Immunabwehr besteht aus speziell gefaltetem Erbmaterial und lässt sich im Prinzip für jede Zielzelle im Organismus maßschneidern. Bisher ist die Entwicklung allerdings erst in Zellkulturen getestet worden. Ob er jemals bei Menschen zum Einsatz kommen kann, ist noch nicht geklärt.

Der „Nanoroboter" gleicht einem sechseckigen Käfig, der nur 45 Nanometer (Millionstel Millimeter) hoch und 35 Nanometer dick ist – damit ist er rund 2.000 Mal dünner als ein menschliches Haar. Der mit einer speziellen Technik namens DNA-Origami gefaltete Käfig besteht aus zwei Hälften, die von Riegeln zusammengehalten werden. Diese Riegel sind so aufgebaut, dass sie ähnlich wie weiße Blutkörperchen die Oberfläche gewünschter Zielzellen – etwa Krebszellen – erkennen und daran andocken können. Mit dem Andocken konfiguriert der Riegel sich neu, so dass der Nanokäfig aufschwingt.

Der Laderaum lässt sich mit verschiedenen Wirkstoffen bestücken, die auf diese Weise gezielt zu ihrem Einsatzort gebracht werden können. Im Experiment belud das Team um Douglas seine winzigen Transporter unter anderem mit molekularen Botenstoffen, die das Selbstmordprogramm einer Zelle aktivieren können. Dieses Programm ist bei Krebszellen typischerweise gestört.

Im Labor konnten die Forscher auf diese Weise die Selbstzerstörung bei Leukämie- und Lymphomzellen auslösen, wobei auch die molekularen Botschaften für die beiden verschiedenen Krebszellen maßgeschneidert werden mussten. Nach diesem Muster könnten verschiedene Aktionen gezielt bei gewünschten Zelltypen ausgelöst werden, erläutern die Wissenschafter.

Die Forscher, die sich für ihre Arbeit von der Funktion des menschlichen Immunsystems inspirieren ließen, bereiten nach den Worten von Douglas als nächstes Tests an Versuchstieren vor.

ist ein Basentriplett, das sich an das Basentriplett der m-RNA (Codon) bindet. Wenn die Aminosäuren miteinander verbunden sind, trennt sich die t-RNA ab und das Ribosom wandert am m-RNA-Strang weiter **(Abb. 245.4)**.

18.4 Klonen *(cloning)*

Klonen ist ein gentechnisches Verfahren. Es dient der Erzeugung von genetisch identischen Lebewesen.

Entnahme des Zellkerns
Eizelle
Einfügen des neuen Zellkerns
Zellkern
Entnahme des Zellkerns
A
B
Geburt
Klon von B

Abb. 247.1 *Klonen*

SO, WHICH ONE OF THESE LITTLE FELLAS IS YOURS ?
FATHER/SON-PICNIC

Abb. 247.2

Thema & Gesellschaft

Vor zehn Jahren starb Klonschaf Dolly

Klonschaf Dolly ging als erster Klon eines erwachsenen Säugetiers in die Annalen ein.

Edinburgh – Der 5. Juli 1996 gilt vielen Forschern als der Beginn des Klonzeitalters. An diesem Tag wurde in einem Stall in Schottland ein Schaf geboren, das in die Geschichtsbücher eingehen sollte: Dolly - der erste Klon eines erwachsenen Säugetiers. Doch Dolly kränkelte, hatte ein für Schafe relativ kurzes Leben und starb vor zehn Jahren am 14. Februar 2003.

Zur Schaffung des ersten Säugetiers ohne biologischen Vater entnahmen die Forscher einer Eizelle den Zellkern. An seine Stelle platzierten sie den Zellkern aus der Euterzelle eines Schafes. Die umfunktionierte Eizelle wurde anschließend in einer Nährlösung zur Teilung angeregt und einer Ersatzmutter eingepflanzt.

Für viele Menschen schien klar: Auch der geklonte Mensch wird kommen - es ist nur eine Frage der Zeit. Bis heute wurde dies jedoch nicht in die Realität umgesetzt. Dennoch folgte auf Dolly rasch ein regelrechter „Klontier-Zoo“ aus Pferden, Ziegen, Schweinen, Mäusen, Hunden und anderen Tierarten. Bei Rindern wird die Technik unter anderem in der Landwirtschaft eingesetzt, um wertvolle Tiere zu kopieren.

Klonen zum medizinischen Einsatz

Auch am Klonen zum medizinischen Einsatz arbeiten Forscher seit vielen Jahren. Dazu wird beispielsweise die Erbsubstanz genetisch verändert, um dem Klon neue Eigenschaften zu verpassen. Beschleunigtes Wachstum, Resistenz gegen Krankheitserreger, Milch ohne Laktose oder Tiere, die in ihrer Milch Medikamente produzieren - die Liste ist lang und erste Erfolge wurden bereits erzielt. Forscher am Genzentrum der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) gewannen auf diese Weise beispielsweise ein Antithrombosemittel.

Therapeutisches Klonen umstritten

Besonders umstritten ist das sogenannte therapeutische Klonen, um etwa Ersatzgewebe für Patienten zu gewinnen. Dabei werden von Frauen gespendete Eizellen entkernt und Kerne mit dem Erbmaterial fremder Körperzellen eingesetzt. Daraus werden Embryonen und schließlich Stammzellen gewonnen. Für das Verfahren muss der Embryo jedoch zerstört werden. Hauptziel ist die Produktion von Zellen, die maßgeschneidert zum Erbgut eines Patienten passen. Noch ist die Technik jedoch im Forschungsstadium. Sie ist unter anderem in Großbritannien unter strengen Auflagen erlaubt.

Auch beim reproduktiven Klonen von Tieren, also dem Erstellen der identischen Kopie eines Individuums, sind immer noch viele Probleme ungelöst. Der Ausschuss an Säugetierembryonen ist sehr hoch und macht das Klonen teuer - nur bis zu einem Prozent der so gewonnen Eizellen führt zu einer erfolgreichen Schwangerschaft. Zudem haben Klontiere häufig Missbildungen und leiden früh an Alterserkrankungen.

19 Biotechnologie

In diesem Kapitel geht es um

- Fermentation
- Gärungen
- Herstellung von Antibiotika

19.1 Fermentation *(fermentation)*

Schon lange bevor die Mikroorganismen entdeckt wurden, verwendete der Mensch unbewusst Biotechnologie, z. B. für die Herstellung von

- Bier und Wein,
- Essig,
- Milchprodukten.

Die **Biotechnologie** (*biotechnology*) ist die Wissenschaft, die sich mit der Herstellung von chemischen Verbindungen mit Hilfe von Mikroorganismen befasst **(Abb. 250.3)**. Diese wandeln die Nährstoffe enzymatisch um und produzieren so das gewünschte Endprodukt. Häufig werden genetisch veränderte Mikroorganismen eingesetzt.

Nach den Anwendungsgebieten unterscheidet man zwischen

- **weißer**,
- **grüner** und
- **roter Biotechnologie** **(Abb. 250.2)**.

Die Verwendung von Mikroorganismen hat vielfach Vorteile gegenüber chemischen Synthesen, z. B.:

- Einsparung von Rohstoffen und Energie,
- Einfacherer Herstellungsprozess,
- Vermeidung bzw. Reduktion von Abfall- und Nebenprodukten.

Abb. 250.1

Abb. 250.2 *Anwendungsbereiche der Biotechnologie*

Abb. 250.3 *Mikroorganismen in der Biotechnologie*

Merk & Würdig

Fermentation ist die enzymatische Umwandlung organischer Stoffe mit Hilfe von Mikroorganismen oder ihrer Enzyme.

Durchführung der Fermentation[1]

Fermentation ist die enzymatische Umwandlung organischer Stoffe. Dies geschieht durch Mikroorganismen in besonderen **Bioreaktoren** (*bioreactors*), den **Fermentern**. Teilweise werden für die Fermentation auch nur die Enzyme der Mikroorganismen verwendet.

Ein Fermenter ist ein geschlossenes Gefäß, in dem die Mikroorganismen gezüchtet werden. Er enthält eine entsprechende Nährlösung. Bei der Fermentation unterscheidet man:

- **aerobe Fermentation** (mit Sauerstoff) und
- **anaerobe Fermentation** (ohne Sauerstoff).

Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und nicht genützter Sauerstoff verlassen den Fermenter durch eine Abgasleitung. Alle Daten (z. B. Konzentration der Stoffe, pH, Temperatur etc.) werden durch Messfühler im Fermenter gemessen und über eine Elektronik ständig geregelt. Bei einer pH-Änderung (z. B. auf Grund der Stoffwechselaktivität) wird automatisch Säure oder Base zugefügt, bis der pH-Wert wieder seinen Normalwert erreicht hat.

1. Schritt:
Apparaturen und Nährlösung werden sterilisiert. Dann wird eine geringe Menge der verwendeten Mikroorganismen in die Nährlösung gegeben (die Nährlösung wird mit den Bakterien oder Pilzen angeimpft).

2. Schritt:
Die Mikroorganismen vermehren sich und produzieren das gewünschte Endprodukt. Die Fermentation kann auf zwei Arten durchgeführt werden:

- **Diskontinuierlich** – Wenn die Nährstoffe verbraucht sind, ist die Fermentation abgeschlossen.
- **Kontinuierlich** – Es wird laufend Nährlösung aus dem Fermenter entnommen und durch frische ersetzt.

3. Schritt
Das gewünschte Produkt wird aus der verbrauchten Nährlösung abgetrennt.

Abb. 250.4 *Laborreaktor*

Abb. 250.5 *Bioreaktoren zur Herstellung von Impfstoffen*

[1] „fermentum" (lat.) = **„Gärung"**; Ferment ist die alte Bezeichnung für Enzym

Beispiel 19.1

Produktion von Insulin

Das Hormon Insulin wird in der Bauchspeicheldrüse gebildet. Es reguliert den Glucose-Gehalt im Blut. Bei Zuckerkrankheit muss Insulin dem Körper zugeführt werden. Früher stellte man Insulin aus Bauchspeicheldrüsen von Schweinen und Rindern her. Heute produziert man es vorwiegend gentechnisch. Dazu wird eine Bakterienzelle so verändert, dass sie menschliches Insulin herstellt. Bakterienzellen besitzen keinen Zellkern. Ihre DNA befindet sich frei im Zellplasma. Außerdem besitzt die Bakterienzelle ringförmige DNA-Moleküle, die Plasmide.

- Mit Hilfe bestimmter Enzyme wird aus einer menschlichen DNA die Erbinformation für das Peptid Insulin herausgeschnitten.
- Diese wird, wieder mit bestimmten Enzymen, in ein Plasmid aus einer Bakterienzelle eingebaut.
- Das veränderte Plasmid wird in die Bakterienzelle eingeschleust.
- Die Bakterienzelle wird kultiviert und produziert ab jetzt menschliches Insulin.

Bakterienzelle enthält Plasmide
Plasmid
Plasmid enthält Information für menschliches Insulin
Bakterienzelle mit gentechnisch verändertem Plasmid
Fermentation
Humaninsulin
DNA eines gesunden Menschen

Abb. 251.1

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du deine Kenntnisse auf dem Gebiet der Biotechnologie beweisen.
Du kannst den Nutzen und die Gefahren der Biotechnologie hinterfragen.

Ü19.1 Warum ist es wichtig, dass Fermenter und Nährlösung bei der Durchführung von Fermentationen steril sind?

Ü19.2 Hefepilze produzieren Alkohol bei der Herstellung von Bier und Wein.
Wo werden sie sonst noch verwendet? Welche Aufgabe haben sie dabei?

Ü19.3 Die folgende Tabelle zeigt die Arbeitsschritte vom Identifizieren des menschlichen Gens für ein Hormon X auf der DNA bis zur Produktion des Hormons X. Ordne sie mit Hilfe der Zahlen 1 bis 7.

___ Ein Bakterienplasmid wird mit Hilfe des Enzyms Restrictionsendonuclease zerschnitten
___ Die menschlichen DNA wird mit Hilfe des Enzyms Restrictionsendonuclease zerschnitten
_1_ Das Gen auf der menschlichen DNA, das das Hormon X codiert wird identifiziert
___ In der Bakterienzelle werden die Plasmide mit dem menschlichen Gen vervielfacht
___ Das zerschnittene Plasmid wird mit dem menschlichen Gen zusammengefügt
___ Die genetische veränderten Bakterien werden in einem Fermenter gezüchtet
___ Das veränderte Plasmid wird in die Bakterienzelle eingefügt

Ü19.4 Die bei Ü 19.3 dargestellten Arbeitsschritte sind Verfahren der Gentechnik. Was ist die englische Bezeichnung für Gentechnik?

Ü19.5 Diskutiere mit deinen Kollegen und Kolleginnen in der Klasse über Vorteile und Gefahren der Biotechnologie.

Merk & Würdig

Gärung ist die Fermentation unter Ausschluss von Sauerstoff.

O2
C2H5OH
Konzentration
aerob
anaerob
CO2
Zeit

Abb. 252.1 *Zusammenhang zwischen Sauerstoffgehalt und Ethanolkonzentration*

Glucose
Ethanol
NAD+
Glycolyse
ATP
NADH + H+
Pyruvat
Acetaldehyd
CO2

Abb. 252.2 *Stoffwechselweg bei der alkoholischen Gärung*

19.2 Gärungen *(fermentation)*

Unter Gärung wird heute meist die Fermentation unter Ausschluss von Sauerstoff verstanden. Prozesse, die mit Sauerstoff ablaufen, nennt man auch **oxidative Gärungen**. Die wichtigsten industriell verwendeten Gärungen sind

- **Alkoholische Gärung**,
- **Essigsäuregärung**,
- **Milchsäuregärung**.

Alkoholische Gärung *(alcoholic fermentation)*

Hefepilze können ihre Energie sowohl durch **Atmung** als auch durch **Gärung** gewinnen.

- **Atmung (aerob)**
  In einem Fermenter, der alle lebensnotwendigen Nährstoffe enthält und ständig belüftet wird, vermehrt sich die Hefe beträchtlich. Sie bildet Kohlendioxid und Wasser. Ethanol entsteht unter diesen Bedingungen nicht.
- **Gärung (anaerob)**
  Stoppt man die Luftzufuhr, so verbraucht die Hefe den noch in der Nährlösung vorhandenen Sauerstoff und schaltet dann ihren Stoffwechsel auf Gärung, eine Art „Notprogramm", um. Die Hefezellen verarbeiten nach wie vor Glucose. Unter anaeroben Bedingungen entstehen **Ethanol** und **Kohlenstoffdioxid**. Die Hefe gewinnt zwar ausreichend Energie zum Überleben, vermehren kann sie sich unter diesen Bedingungen aber nicht.
  Ethanol ist für die Hefe ein giftiges Stoffwechselprodukt, an dem sie zugrunde geht, wenn die Konzentration je nach Heferasse etwa 12–18 % überschreitet. Höherprozentige alkoholische Getränke (z. B. Whisky, Cognac) müssen daher durch Destillation gewonnen werden.

Thema & Gesellschaft

Stroh statt Getreide für Biosprit

Ethanol. Die Herstellung von Biokraftstoff ist wegen steigender Preise für Getreide, Mais und Zuckerrohr in Verruf geraten. Jetzt starten Versuche mit Abfall, Holz und Stroh.

Biosprit gilt als umweltfreundlich, aber er ist trotzdem in Verruf gekommen. Die Verwendung von Getreide, Mais oder Zuckerrohr für die Energieerzeugung hat die Preise dieser Produkte für den Lebensmittelmarkt in die Höhe getrieben.

Die Experten nennen allerdings eine Ausnahme: Biogas aus Abfall wie Hausmüll, Abwasser und Gülle. Darüber hinaus sei auch Bioethanol aus Holz und Stroh empfehlenswert, wenn dieser Kraftstoff deutlich klimafreundlicher werde als Benzin.

Als Beispiel für die weitere Entwicklung nennen die „Energie-Perspektiven" des Fraunhofer Instituts eine Demonstrationsanlage, die im Juli 2012 in Straubing eröffnet wurde. Der Schweizer Konzern Clariant will hier jährlich aus etwa 4500 Tonnen Weizenstroh bis zu 1000 Tonnen Ethanol herstellen. Die für den Menschen unverdauliche Zellulose wird dabei aus dem Stroh mit Hilfe von Enzymen in Zuckerbestandteile gespalten. In der Folge halten sich die Energietechniker an die Kunst der Bierbrauer: Hefe verwandelt den Zucker in den Alkohol Ethanol, der Benzin beigemischt werden kann.

Milchsäuregärung *(lactic acid fermentation)*

Milch ist reich an Nährstoffen, Vitaminen und Mineralsalzen und daher auch für Mikroorganismen ein wertvolles Nahrungsmittel. Das ist auch der Grund, warum Milch ohne besondere Konservierungsmaßnahmen innerhalb von Tagen verdirbt.

Milchsäurebakterien wandeln Monosaccharide aus der Milch in Milchsäure um.

OH
OH
H_3C
O

Abb. 253.1 *Milchsäure*

Glucose + 2 ADP + 2 Phosphat → 2 Milchsäure + 2 ATP + 2 H_2O

Zur Herstellung von Käse wird das Eiweiß der Rohmilch denaturiert („**Dicklegen der Milch**“). Dies geschieht

- mit Hilfe von **Milchsäurebakterien**, oder
- durch Zusatz von **Labferment**. Dieses wurde ursprünglich aus Kälbermägen hergestellt, heute wird es gentechnologisch gewonnen.

Anschließend wird das Eiweiß abgetrennt („**Käsebruch**“) und in Formen gefüllt. Nach einem Salzbad und einer entsprechenden Reifezeit ist der Sauermilchkäse fertig.

Nach demselben Prinzip, allerdings mit anderen Milchsäurebakterien und unter anderen Gärungsbedingungen, entstehen Jogurt und Sauermilch. Bei Kefir läuft neben der Milchsäuregärung noch eine alkoholische Gärung ab.

Abb. 253.2 *Dicklegen von Milch*

Essigsäuregärung *(acetic acid fermentation)*

Essigsäurebakterien beziehen ihre Energie durch Umwandlung von Ethanol in Essigsäure. Dabei verbrauchen sie Sauerstoff Dieser Prozess ist daher eine **oxidative Gärung**.

$C_2H_5OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O$

Zur Erzeugung von Gärungsessig werden Essigsäurebakterien in einem Fermenter in einer alkoholhaltigen Nährlösung (z. B. Weißwein) verteilt. Die notwendige Gärzeit beträgt etwa 36 Stunden. Das Verfahren kann aber auch kontinuierlich durchgeführt werden.

Abb. 253.3 *Balsamico, Rot- und Weißweinessig*

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du einen Zusammenhang zwischen Biotechnologie, Ernährung und deinen Alltags-erfahrungen herstellen.

Ü19.6 Wenn man Wein einige Tage offen stehen lässt, wird er sauer.
a) Welche Reaktion hat stattgefunden,
b) Warum geschieht das nicht bei Whisky?

Ü19.7 Was sind die Rohstoffe für die Erzeugung von
a) Bier,
b) Wein?

Ü19.8 Unter welchen Bedingungen kann der Mensch Milchsäure produzieren? Wo findet diese Synthese statt?

Abb. **254.1** *Natürliche Penicilline werden durch Schimmelpilze produziert (z. B. Penicillium notatum)*

19.3 Herstellung von Antibiotika *(production of antibiotics)*

Antibiotika sind Substanzen, die meist von Mikroorganismen produziert werden und andere Mikroorganismen in ihrem Wachstum hemmen oder abtöten. Das erste Antibiotikum war **Penicillin**, genannt nach dem Pilz Penicillium.

Die zur Herstellung von Antibiotika verwendeten Mikroorganismen sind Bakterien oder Pilze. Sie werden in Bioreaktoren gezüchtet. Aus der Nährlösung können die Antibiotika abgetrennt werden. Vielfach werden sie anschließend noch chemisch verändert (halbsynthetische Antibiotika) – siehe auch **Seite 199, Beispiel 14.1**.

Wirkung von Antibiotika *(action of antibiotics)*

Antibiotika wirken spezifisch auf bestimmte krankheitserregende Bakterien.

Man unterscheidet folgende Antibiotika-Wirkungen:

- **bakterizid** – Antibiotikum tötet die Bakterien ab.
- **bakteriostatisch** – Antibiotikum hemmt die Vermehrung der Bakterien.

Breitband-Antibiotika wirken auf eine Vielzahl unterschiedlicher Keime.

Antibiotika greifen in den Stoffwechsel der Bakterienzelle ein und hemmen z. B. die Proteinbiosynthese oder die Synthese der Zellwand.

Thema & Gesellschaft

Tuberkulose: Wirkmechanismus neuer Antibiotika entschlüsselt

Internationales Forscherteam konnte für Überleben von Mycobacterium tuberculosis wichtiges Protein analysieren
Die Tuberkulose gehört zu den weltweit häufigsten Infektionskrankheiten. Zunehmend resistente Bakterien erschweren die Behandlung und Eindämmung der Infektionen. Einem internationalen Forscherteam ist es erstmals gelungen, die Struktur des Proteins DprE1 zu entschlüsseln, das für das Überleben von Mycobacterium tuberculosis, dem häufigsten Erreger, essenziell ist. …
Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation WHO zufolge ist etwa ein Drittel der Weltbevölkerung mit Mycobacterium tuberculosis infiziert. Rund jeder Zehnte davon erkrankt im Laufe seines Lebens an Tuberkulose, wobei sich das Risiko für HIV-Infizierte auf das über 20-fache erhöht. Das Enyzm DprE1 spielt eine entscheidende Rolle beim Aufbau der Zellwand des Bakteriums. Erst vor einigen Jahren wiesen Forscher nach, dass es für die Produktion von Arabinose zuständig ist. Der Zuckerbaustein ist Bestandteil der mehrschichtigen Zellwand der Bakterien. Ohne ihn kann der Tuberkulose-Erreger nicht überleben. …
Da das Enzym DprE1 nur in Mycobakterien und verwandten Organismen, nicht aber im Menschen vorkommt, eignet es sich hervorragend als Wirkort für Antibiotika. Ähnlich ist es beim alten, erprobten Penicillin, das ja auch in die Zellwandsynthese von Bakterien eingreift.

Chance auf neue Wirkstoffe
In ihrem Fachartikel in PNAS zeigen die Wissenschafter, wie erst seit wenigen Jahren eingesetzte, hochwirksame Antibiotika aus der Gruppe der Benzothiazinone wirken. Sie docken auf molekularer Ebene an der Aminosäure Cys387, einem Bestandteil des Enzyms, an und unterdrücken dessen Funktion bei der Herstellung von Arabinose.

Übungen

Mit folgenden Übungen kannst du einen Zusammenhang zwischen Biotechnologie, Medizin und deinen Alltagserfahrungen herstellen.

Ü19.9 Die optimale Wirkung eines Antibiotikums ist gegeben, wenn es die Bakterienzelle abtötet und auf die menschliche (tierische) Zelle keine Wirkung hat. Penicillin unterbindet die Synthese der Zellwand von Bakterien. Warum wirkt Penicillin nicht auf menschliche Zellen?

Ü19.10 Die Kurven in **Abb. 254.2** zeigen das Wachstum von Bakterien
a) ohne Behandlung mit Antibiotika
b) mit einem bakteriziden Antibiotikum
c) mit einem bakteriostatischen Antibiotikum
Ordne **a)**, **b)** und **c)** den Kurven 1, 2 und 3 zu

Abb. 254.2

Ü19.11 *Some bacteria are resistant to penicillin because they produce penicillinase. This substance destroys penicillin before it can take effect. What would you expect? Is penicillinase*
***a)** RNA* ***b)** protein* ***c)** enzyme* ***d)** lipid*

1 Naturwissenschaftliches Arbeiten

Ü 1.1 **a)** $v(t) = -0{,}03t^2 + 1{,}5t - 0{,}3$
$a(t) = -0{,}06t + 1{,}5$
b) $-0{,}01\ s^{-3}m$; $0{,}75\ s^{-2}m$; $-0{,}3$ m/s
c) $s(25s) = 305$ m; $v(25s) = 18{,}45$ m/s;

Ü 1.2 $s = -\int_{t_1}^{t_2} v(t)dt = -v_{max} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \cos(\omega t)$
a) $s = 5$ m
b) $s = 6\,397$ km (ca. Erdradius)

Ü 1.3 $W = 5{,}11\frac{x^4}{4} - 6{,}57\frac{x^3}{3} + 2{,}03\frac{x^2}{2} = 0{,}043\ kJ = 43\ J$

Ü 1.4 **a)** Individuelle Antwort
b) $s(t) = -\int_0^{600s} 10\frac{km}{h} dt = 2{,}78t\ |_0^{600s} = 1667m$
c) 7,5 km

2 Relativitätstheorien

Ü 2.1 **a)** Michelson-Morley-Interferometer
b) ein durchsichtiges Medium, in dem sich Licht ausbreiten kann
c) Den Bewegungszustand von Inertialsystemen kann man nur relativ zu anderen angeben. Die Erde (und damit auch der Physiksaal) ist genau genommen kein Intertialsystem, weil sie rotiert.

Ü 2.2 Individuelle Antwort

Ü 2.3 $t = 2{,}3$ h

Ü 2.4 **a)** 1,02 **b)** 1,667 **c)** $22{,}4 \cdot 10^3$

Ü 2.5 Individuelle Antwort

Ü 2.6 $x = 0{,}899$ km; $t_H = 15{,}22\mu s$

Ü 2.7 **a)** 21,1 ns **b)** 9 ns **c)** 2,83 m

Ü 2.8 $f_B = f_Q$ (klassische Physik)

Ü 2.9 $v = c$

Ü 2.10 $v = c$

Ü 2.11 $\Delta f = 1{,}2$ kHz; $f_B = 9{,}9999988$ GHz

Ü 2.12 0,51c

Ü 2.13 0,053c

Ü 2.14 **a)** $m = 2{,}09 \cdot 10^{-30}$ kg
b) $p = 2{,}46 \cdot 10^{-22}$ kgm/s

Ü 2.15 $v = 0{,}995 \cdot c$

Ü 2.16 Individuelle Antwort

Ü 2.17 $E = 9 \cdot 10^{16}$

Ü 2.18 $E = 1{,}51$ MJ; $\Delta m = 1{,}7 \cdot 10^{-11}$ kg

Ü 2.19 $E = W \cdot t = 3{,}3 \cdot 10^{31}$ kg; $\Delta m = 3{,}65 \cdot 10^{14}$ kg

Ü 2.20 $p = 1{,}3 \cdot 10^{-27}$ kg; $m = 4{,}4 \cdot 10^{-36}$ kg

Ü 2.21 $f = 1.1 \cdot 10^{24}$ Hz

Ü 2.22 $p = 1{,}2 \cdot 10^{-27}$ kg; $m = 3{,}8 \cdot 10^{-36}$ kg

Ü 2.23 **a)** haben als lotrechte Achse die komplexe Raumzeit aufgetragen. /… veranschaulichen Weltlinien.
b) … trennen Vergangenheit und Zukunft. / … veranschaulichen die Ausbreitung des Lichts in der mehrdimensionalen Raumzeit.
c) … hat was mit Gravitation zu tun.
d) Die gravitative Zeitdilatation lässt das Herz in der Nähe großer Massen langsamer schlagen. / Beim Empfang von Signalen aus dem Weltall ist gravitative Blauverschiebung immer vorhanden, allerdings ist der Effekt sehr klein.

Ü 2.24 **a)** Äquivalenzprinzip
b) Torsionspendel

3 Grundlagen der Quantenmechanik

Ü 3.1 Theorien haben bei hohen Frequenzen der Strahlung eines Schwarzen Körpers viel zu hohe Intensität vorausgesagt.
Kontinuierliche Energieverteilungen der Oszillatorschwingungen haben zu falschen Voraussagen der Schwarzkörperstrahlung geführt.

Ü 3.2 Individuelle Antwort

Ü 3.3 Individuelle Antwort

Ü 3.4 Austrittsarbeit aus Diagramm auslesen: WA = (-)5eV;
a) $E = 8 \cdot 10^{-19}$ J
b) $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \approx 50$ nm
c) $p \sim 3 \cdot 10^{-27}$ kgm/s

Ü 3.5 $k = \frac{\Delta E}{\Delta f} = \frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J}{5{,}6 \cdot 10^{14}\ Hz} \approx h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Js

Ü 3.6 $v = \frac{h}{m \cdot \lambda} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\ Js}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg \cdot 700 \cdot 10^{-9}\ m} \approx 1000$ m/s

Ü 3.7 $m = \frac{h}{m \cdot \lambda} \approx 6{,}6 \cdot 10^{-22}$ kg,
das sind ca. 400 000 atomare Masseneinheiten

Ü 3.8 $\lambda = \frac{h}{m \cdot \lambda} \approx 0{,}36$ nm

Ü 3.9 $m \cdot \Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \Rightarrow \Delta v \approx \frac{h}{m \cdot \Delta x 4\pi} \Rightarrow \Delta v \approx 5800$ m/s

Ü 3.10 Die Geschwindigkeitsunschärfe muss kleiner sein als die angegebene Geschwindigkeit;
Annahme: $\cdot\ \Delta v = 10^6$ m/s, dann ergibt sich eine Ortsunschärfe in der Größenordnung von $6 \cdot 10^{-11}$m; die Spur in einer Blasenkammer hat eine Breite im Millimeterbereich, daher ist die Ortsunschärfe bei weitem vernachlässigbar.

Ü 3.11 Geschwindigkeitsunschärfe: 3m/s; Ortsunschärfe ist im Bereich von $2 \cdot 10^{-29}$ m, das ist um viele Zehnerpotenzen kleiner als ein Atomkern, die Ortsunschärfe ist daher vernachlässigbar.

Ü 3.12 **a)** $\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{4\pi} \Rightarrow \Delta E \approx \frac{h}{\Delta t 4\pi} \Rightarrow$

$\Delta E \approx 5{,}3 \cdot 10^{-27}$ J; $\Delta f \sim 8$ MHz

b) Individuelle Antwort

Ü 3.13 **a)** $\cdot \Delta t \approx \frac{h}{\Delta E 4\pi} \Rightarrow \Delta t \approx 1{,}7 \cdot 10^{-25}$ s
(Beachte: Materie-Antimateriepaar)

b) $s \sim -2 \cdot 10^{-18}$ m

Ü 3.14 **a)** $\Delta t \sim 2 \cdot 10^{-27}$ s; $\Delta s \sim 5 \cdot 10^{-19}$ m
b) Da keine Ruhemasse: Unendlich

Ü 3.15 Individuelle Antwort

Ü 3.16 Den Elektronen „verbieten" in den Atomkern zu fallen. Erklären, dass Vakuum nicht wirklich leerer Raum ist.

Ü 3.17 Individuelle Antwort

Ü 3.18 Das Elektron erhöht seine Energie, da seine Impulsunschärfe steigt.
Zum Verkleinern des „Käfigs" benötigt man Energie. Das Elektron könnte mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch die Potentialwände durchtunneln.

Ü 3.19 Individuelle Antwort

Ü 3.20 Individuelle Antwort

4 Atom- und Kernphysik

Ü 4.1 Rutherford: gar nicht;
Bohr: mittels der Quantenbedingung

Ü 4.2 **a)** Wegen der Heisenberg'schen Unschärferelation; ist der Ort eines Elektrons bekannt, so ist sein Impuls und somit Ekin unbestimmt.
b) $E_{pot} = -13{,}6$ eV (entspricht der Bindungsenergie);

c) $E_{pot} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} = -4{,}34 \cdot 10^{-18}$ J $= -27{,}1$ eV

Ü 4.3 $T \approx 110\,000$ K

Ü 4.4 Paschen: $f = 1{,}6 \cdot 10^{14}$ Hz (IR);
Lyman: $f = 2{,}2 \cdot 10^{15}$ Hz (UV)

Ü 4.5 richtige Antwort: **b)**

Ü 4.6 8,82 MeV

Ü 4.7 **a)** falsch
b) richtig
c) falsch
d) falsch
e) richtig

Ü 4.8 30 km

Ü 4.9 Aktivität der gesamten Molke:
$A = 2000$ kg $\cdot$ 1200 Bq/kg $= 2{,}4 \cdot 10^9$ Bq

a) aus $A = \frac{N \cdot \ln 2}{T_1} / 2$ folgt $N = 3{,}3 \cdot 1018$ Atome

b) aus $n = \frac{N}{N_{1A}}$ und $m = n \cdot N$ folgt

$m = 7{,}5 \cdot 10^{-7}$ kg $\Rightarrow V = 4 \cdot 10^{-10}$ m$^3 \Rightarrow a = 0{,}74$ mm

Ü 4.10 $T_{1/2} = 8{,}3$ s

Ü 4.11 richtige Antwort: **c)**

Ü 4.12 ^{231}Th

Ü 4.13 **a)** ^{222}Rn **b)** ^{2}H

Ü 4.14 Sie kannten keine Kernphysik.

Ü 4.15 korrekte Aussagen: **a)**, **d)**, **e)**

Ü 4.16 Röntgenstrahlen eignen sich nur für Tumorbekämpfung bei oberflächlichen Tumoren; darunter liegendes gesundes Gewebe wird beeinträchtigt. Protonen: für tiefer liegende Tumore geeignet

Ü 4.17 **a)** blau: unerwünschte Dosis im gesunden Gewebe, rot: Lage des Tumors
b) nur der Tumor wird geschädigt/zerstört; gesunde Organe bleiben verschont
c) sie schädigen nicht so viel umgebendes gesundes Gewebe
d) bisher: nur oberflächliche Tumore konnten bestrahlt werden; siehe auch **Ü 4.18**
e) z. B. tiefliegende (z. B. Bauchspeicheldrüse); Tumore von Schwangeren (wegen Gefährdung des Embryos)

Ü 4.18 Kosmische Strahlung trifft Neutronen in der Atmosphäre; diese reagieren mit den Stickstoffatomen und es entstehen ^{14}C-Atome, die sich in CO_2-Molekülen eingebaut werden; diese werden von Organismen aufgenommen; stirbt das Tier, wird kein weiteres ^{14}C aufgenommen und es beginnt zu zerfallen

Ü 4.19 Niemand; $T_{eff} = 87{,}7$ d
Im militärischen Bereich wird großzügiger gerundet, um ein etwas höheres Maß an Sicherheit zu erzielen.

Ü 4.20 ^{94}Rb (Rubidium)

Ü 4.21 zutreffende Aussagen: **a)**, **d)**, **e)**, **f)**

Ü 4.22 Neutronen sind neutral und werden daher vom Kern nicht abgestoßen

Ü 4.23 β^--Strahlung; ein Elektron wurde emittiert;
$^{238}U + {}^{2}H \rightarrow {}^{238}Np + 2\,n$; $^{238}Np \rightarrow {}^{238}Pu + e$

Ü 4.24 **a)** ca. $3 \cdot 10^7$ Sv/t
b) nach 200 Jahren

Ü 4.25 **a)** $V = 40\ m^3$; $a = 3{,}4\ m$
b) Es muss nicht nur das Pu endgelagert werden, sondern auch Brennstäbe, Hüllrohre, etc.
c) $N = 7{,}8 \cdot 10^{24}$ Atome auf ganzer Erde; daher: $1{,}5 \cdot 10^{10}\ /m^2$
d) $1{,}49 \cdot 10^{24}$ Atome

Ü 4.26 **a)** ^{239}Pu wird mit Neutronen beschossen und wird zu ^{240}Pu (im angeregten Zustand) und gibt ein Gamma-Quant ab; ^{240}Pu ist radioaktiv; bei β^- wird daraus ^{240}Am; bei β^+ wird daraus ^{240}Np
b) 400 Jahre
c) Vorteile: Verringerung der Halbwertzeit und Reduzierung der Radiotoxizität
Nachteile: Erst in einigen Jahrzehnten im großen Maßstab einsetzbar; Kosten noch nicht kalkulierbar.

Ü 4.27 $E = 2{,}26 \cdot 10^{-12}\ J$

Ü 4.28 $\frac{1}{2}\, m \cdot v^2 = 3/2\, k \cdot T$; daher gilt die Proportion
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1^2}{v_2^2}$$
$T_2 = 300\ K$, $v_1 = 106\ m/s$, $v_2 = 2000\ m/s$ einsetzen

6 Astrophysik

Ü 6.1 $m = 2 \cdot 10^{30}\ kg$

Ü 6.2 **a)** $F_{ES} > F_{EM}$
b) $F_{ME} = 2 \cdot 10^{20}\ N$; $F_{SE} = 3{,}6 \cdot 10^{22}\ N$

Ü 6.3 Gleichsetzen von Gewicht und Gravitationsgesetz ergibt:
$$M = \frac{g \cdot r^2}{G} = 1{,}8 \cdot 10^{25}\ kg$$

Ü 6.4 richtige Antwort: **b)**

Ü 6.5 Auf Grönland lastet eine Eismasse von etwa $3 \cdot 10^{15}$ t. Diese Eismasse **drückt** auf der Landmasse. Wenn das Eis schmilzt, wird die Lithosphäre entlastet. Es entsteht ein **Massendefizit**, das von GRACE gemessen werden kann. An dieser Stelle ist die Bahn des Satelliten um einige Zehntelmillimeter **näher** bei der Erde. Das geschmolzene Eis (ca. 240 Milliarden Tonnen pro Jahr) verteilt sich gleichmäßig auf die Weltmeere und lässt den Wasserspiegel um 0,7 mm pro Jahr **steigen**. Das **Massenträgheitsmoment** der Erde ändert sich dadurch. Sogar die jahreszeitlich bedingten Veränderungen des Wassergehalts der Atmosphäre lässt sich mit GRACE nachweisen.

Ü 6.6 **a)** ellipsen- und hyperbelförmig
b) richtige Antwort: **(3)**

Ü 6.7 richtige Antwort: **b)**

Ü 6.8 richtige Antwort: **c)**

Ü 6.9 richtige Antwort: **b)**

Ü 6.10 **Abb. 100.1** kann einem **(a)** Gravitationsfeld, **(d)** elektrischen Feld und **(e)** Strömungsfeld zugeordnet werden.
Einem magnetischen Feld **(b)** kann **Abb. 100.1** nicht zugeordnet werden, weil es keine magnetischen Monopole gibt.
Einem Temperaturfeld **(c)** kann **Abb. 100** nicht zugeordnet werden, da Temperatur keine Richtung hat.

Ü 6.11 **a)** Feldlinien
b) Feldlinien
c) Äquipotenziallinien
d) Feldlinien

Ü 6.12

Stern
weiter mit dem Sinussatz
α
β
Position der Erde
Sonne
Position der Erde nach einem halben Jahr

Ü 6.13 $[H] = s$; $1/H = t = 1{,}3 \cdot 10^{11}$ a (= Alter des Universums)

Ü 6.14 **a)** *k* … Boltzmann-Konstante
T … Temperatur der Wolke
r … Radius der Wolke
G … Gravitationskonstante
m_o … Masse der Teilchen (zum Großteil Wasserstoff) in der Wolke

b) $[k] = J/K$; $[T] = K$; $[r] = m$, $[G] = Nm^2/kg^2$,
$$[m_o] = kg \cdot [m] = \frac{J/K \cdot K \cdot m}{Nm^2kg^{-2} \cdot kg} = kg$$

c) Die Wolke wird bei steigender Temperatur und größerem Radius instabil.

d) $$M \geq \frac{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 3 \cdot 10^{17} m \cdot 20K}{2 \cdot 3{,}3 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} Nm^2kg^{-2}} = 5{,}6 \cdot 10^{32}\ kg;$$
entspricht etwa 280 Sonnenmassen

7 Wärme und Temperatur

Ü 7.1 – 2°C entspricht 28,4 °F, daher ist es in Wien wärmer.

Ü 7.2 $\vartheta_{Si} = 15{,}590 \cdot 10^6\ °C$, $\vartheta_{So} = 5487\ °C$;
$f_{Si} = 0{,}0017\ \%$, $f_{So} = 4{,}7\ \%$

Ü 7.3 **a)** 99,5 °F **b)** 38,3 °C

Ü 7.4 **1)** Kalk
2) Bremsen
3) Knallgas
4) Reversibel
5) Reibung
6) Gärung
Blau unterlegtes Feld: Kelvin

Ü 7.5 Gleich setzen von $m \cdot c_{Fe} \cdot \Delta T = m \cdot g \cdot h \Rightarrow \Delta T = 5{,}5$ K

Ü 7.6 Wegen des großen c_{Wasser}:
ozeanisch: Meerwasser speichert die Sommerwärme und gibt sie im Winter ab.
kontinental: Erdboden speichert die Wärme, gibt sie aber wieder schnell ab.

Ü 7.7
a) $Q = 25$ MJ
b) Das Warmwasser kostet 1,04 €; insgesamt kostet das Vollbad 1,24 €

Ü 7.8
a) $E_{kin} = 1{,}17$ MJ
b) $\Delta T = 456$ K; $\vartheta = 486$ °C
c) $\Delta T = 11{,}6$ K, $\vartheta = 72$ °C

Ü 7.9 $Q_w = 21{,}8$ MW; $Q_s = P \cdot t = 11{,}5$ MJ pro m²; $A = 1{,}89$ m²

Ü 7.10 richtige Antworten: 1, 2

Ü 7.11 $Q = 120$ kJ
a) $\Delta T = 258$ K; $\vartheta = 238$ °C
b) $\Delta T = \frac{Q}{m_1 c_1 + m_2 c_2} = \text{kg}$
Temperatur der Schokolade: 66,2 °C

Ü 7.12 $Q = 1{,}4$ MJ

Ü 7.13
a) $Q_1 = 0{,}2$ MJ, $Q_2 = 1{,}7$ MJ, $Q_3 = 2{,}1$ MJ, $Q_{ges} = 4{,}0$ MJ;
b) $Q_{dampf} = 11{,}3$ MJ, $Q = 15{,}3$ MJ

Ü 7.14 $m_{Saft} \cdot c \cdot \Delta T = m_{Eis} \cdot q \Rightarrow \frac{m_{Eis} \cdot \Delta T}{q} = 0{,}079$ kg
Es sind also etwa 6 Eiswürfel mit jeweils 13 g notwendig.

Ü 7.15
a) $Q_1 = 9{,}8$ kJ, $Q_{sch} = 6{,}1$ kJ, $Q_{ges} = 15{,}8$ kJ
b) $m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = 0{,}079$ kg $= 12{,}9$ kg
Das entspricht dem Energieaufwand für mehr als 64 Portionen Kaffee.

Ü 7.16 Wasser verdunstet, die Verdunstungswärme kommt von der Körperoberfläche.

Ü 7.17 $P = 421$ MW

Ü 7.18 richtige Antwort: **2)** (aus Gründen der Isolation)

Ü 7.19
a) $Q = 1{,}7$ GJ $= 461$ kWh
b) $t = 230{,}5$ h, more than 9 days

Ü 7.20
a) keine Frostsprengungen von Felsen; Erosion und daher auch Humusbildung dauert länger.
b) Fische und Amphibien besitzen andere Überlebensstrategien im gefrorenen Wasser

Ü 7.21 richtige Antwort: **b)**

Ü 7.22 richtige Antworten: **a)** 1 **b)** 2

Ü 7.23 $m = 900$ kg, $V = 947$ l

Ü 7.24 $Q = 10$ GJ

Ü 7.25
a) $Q = 4{,}5$ GJ
b) $m = 92$ kg, $V = 129$ m³ Gas pro Tonne Müll

Ü 7.26
a) $Q = 29$ MJ
b) $m = 14$ kg carrots
c) $P = 333$ W

8 Das Verhalten von Gasen und die Gaskinetik

Ü 8.1 $\frac{V}{T} = \text{const}$;
$V_2 = 169{,}2$ m²; es sind also etwa 20 m³ nach außen gedrängt worden

Ü 8.2 $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$; $\Rightarrow p_2 = 1{,}95$ bar

Ü 8.3 Es muss sich auch die Temperatur verdoppeln.

Ü 8.4 $\vartheta = 273$ °C

Ü 8.5
a) $p = 0{,}81$ MPa
b) $V = 1194{,}4$ l
c) $T = 45{,}7$ K

Ü 8.6
a) $\vartheta = 273$ °C
b) $\vartheta = -136{,}5$ °C

Ü 8.7
a) 10 m Wassersäule üben einen Druck von 1 bar aus + Atmosphärendruck $\Rightarrow p = 2$ bar
b) $p \cdot V = \text{const}$ ergibt $V = 3{,}3$ l

Ü 8.8
a) isotherm
b) nicht isotherm
c) nicht isotherm
d) isotherm

Ü 8.9

isotherm	isobar	isocho
(V) (T) 0	(V) (T) 0	(V) (T) 0

Ü 8.10 **a)** V oder T fehlt **b)** V fehlt

Ü 8.11
a) Nein, da Temperatur mit der Höhe fällt.
b) Nein, das Druck mit Höhe abnimmt.
c) Nein, da Volumen des Ballons größer wird.
d) Ja.

Ü 8.12 Das Volumen von Gasen müsste sonst (vollständig) verschwinden.

Ü 8.13 $\frac{V}{T} = \text{const} \Rightarrow V_2 = 1{,}47$ dm³

Ü 8.14 $M = m_o \cdot N_A$
a) 1 H-Atom $\Rightarrow m_o = 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g
b) 2 H-Atome + 1 O-Atom $= 2 \cdot M_H + M_O \Rightarrow$ $m_o = 29{,}9 \cdot 10^{-24}$ g
c) 2 O-Atome: $m_o = 53{,}1 \cdot 10^{-24}$ g

Ü 8.15 $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$
a) $N = 2{,}65 \cdot 10^{25}$ Moleküle
b) $N = 3 \cdot 10^{8}$ Moleküle

Ü 8.16 Für den Zustand 1 gilt: $p_1 \cdot V_1 = m_1 \cdot R_S \cdot T_1$
Für den Zustand 2 gilt: $p_2 \cdot V_2 = m_2 \cdot R_S \cdot T_2$
Außerdem gilt $m_2 = ½ \cdot m_1$ und $V_1 = V_2$
Dividieren der Gleichungen und einsetzen ergibt:
$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{2 \cdot T_1}$; $p_2 = 16{,}9$ bar

Ü 8.17 aus $p \cdot V = m \cdot R_S \cdot T$ folgt

$$p = \frac{m}{V} = \frac{p}{R_S \cdot T} \Rightarrow \rho = 8{,}4\,\frac{kg}{m^3}$$

Ü 8.18 $p \cdot V = m \cdot R_S \cdot T \Rightarrow m = 0{,}17$ mg
$p \cdot V = N \cdot k \cdot T \Rightarrow N = 2{,}6 \cdot 10^{18}$ Atome

Ü 8.19 $p \cdot V = N \cdot k \cdot T \Rightarrow p = 10^{-11}$ Pa $= 10^{-16}$ bar

Ü 8.20 $\frac{p \cdot V}{T} = \text{const} \Rightarrow V_2 = 0{,}86\ m^3$

Ü 8.21 Die H-Moleküle haben die größere Geschwindigkeit. Da das Gemisch gleiche Temperatur hat, sind die mittleren kinetischen Energien der Teilchen gleich:

$$\frac{1}{2} \cdot m_h \cdot v_H^2 = \frac{1}{2} \cdot m_N \cdot v_N^2$$

Da die Masse der H-Moleküle kleiner ist als die der N-Moleküle, müssen ihre mittleren Geschwindigkeiten größer sein.

Ü 8.22 Kombination der beiden Gleichungen
$E_{kin} = \frac{2}{3} \cdot kT$ (mittlere Energie eines Teilchens) und
$p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ (zum Bestimmen der Anzahl der Teilchen) ergibt $E_{kin} = \frac{2}{3} \cdot pV = 1{,}5 \cdot 10^5$ J

Ü 8.23 k gibt die mittlere kinetische Energie der Teilchen pro Kelvin an.

Ü 8.24 Bei gleicher Temperatur bewegt sich das Gas mit der größeren (molaren) Masse mit der kleineren Geschwindigkeit. He_4 bewegt sich also langsamer.

Ü 8.25
a) Einsetzen in die Gleichung $v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_o}}$ liefert $v = 12\,000$ m/s.
b) $v_{Flucht} = 617\,000$ m/s $\Rightarrow v_{Flucht} > v$
Das eine oder andere H-Atom wird sicherlich eine derartig hohe Geschwindigkeit erreichen. Der Wasserstoff der Sonne wird insgesamt nicht entweichen.

Ü 8.26 Erdbevölkerung $N = 8 \cdot 10^9$;
$p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ und $V = a^3 \Rightarrow$
Seitenkante $a = 6{,}7 \cdot 10^{-3}$ mm;
$v = 2600$ m/s

Ü 8.27 richtige Antwort: **a)**

Ü 8.28 $O_1 : O_2 = 1 : 4$
$V_1 : V_2 = 1 : 8$
$N_1 : N_2 = 1 : 1$
$p_1 : p_2 = 1 : 1/8$
$v_1 : v_2 = 1 : 1; T_1 : T_2 = 1 : 1;$
$m_1 : m_2 = 1 : 1$

Ü 8.29
a) die meisten Moleküle bewegen sich mit $v = 450$ m/s
b) richtige Antworten: **3)**, **5)**, **6)**
c) Isotherme
d) Die Kurve wird flacher und breiter.
e) richtige Antwort: **3)**
f) individuelle Lösung
g) richtige Antworten: **1)**, **3)**, **5)**

9 Wärme und Arbeit

Ü 9.1
a) … von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden.
b) … eine Erweiterung des Energieerhaltungssatzes.
c) größer.
d) … Energie bleibt erhalten.

Ü 9.2
a) $P = \frac{1}{2^n} = 0{,}0625 = 6{,}25\ \%$
b) Individuelle Bearbeitung

Ü 9.3
a) $\frac{V}{T} = \text{konst} \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 107$ mm; $\Delta V = 7\ m^3$
b) $W = 0{,}71$ MJ

Ü 9.4
a) $V_2 = \frac{p_1 V_1}{P_2} = 367\ m^2$
b) $n = \frac{pV}{RT} = 22{,}6$ kmol
c) $W = nRT \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} = 22{,}2$ MJ
$P = 6{,}2$ kW

Ü 9.5 Isotherme Zustandsänderung und allgemeines Gasgesetz ergeben:

$$v_1 = \frac{W}{P_1 \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}} = \frac{2300\ kW \cdot 3600\ s}{45 \cdot 10^5\ Pa \cdot \ln \frac{5}{45}} = 837\ m^2$$

Ü 9.6

Ü 9.7 $T_1 \cdot p_1^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_2 \cdot p_2^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$

$\frac{1-k}{k} = -0{,}29 \Rightarrow$

$$\sqrt[0,29]{\frac{T_2 \cdot p_2^{-0,29}}{T_1}} = 300\ K \cdot \left(\frac{3\ bar}{1\ bar}\right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = \mathbf{231\ kPa}$$

Ü 9.8

$$T_2 = \frac{T_1 \cdot p_1^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}{p_2^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}} = 328\ K \cdot \left(\frac{1\ bar}{20\ bar}\right)^{0,29} = \mathbf{728\ K = 509\ °C}$$

Die Selbstentzündung ist daher möglich.

Ü 9.9 $p \cdot V = nRT \Rightarrow p = 12{,}1$ bar

Ü 9.10
a) $\eta = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{1100\ K}{1973\ K} = 0{,}56$
b) $Q_{Zu} = 21{,}5$ kJ; $W = 12$ kJ
c) $P = 200$kW

Ü 9.11
a) $\eta = 0{,}69$
b) $\eta = 0{,}68 \cdot 1{,}1 = 0{,}76;$

Ü 9.12

Abb. 286.1

Ü 9.13 *There must be something wrong, because the efficiency of the machine is 30 %.*
So it would work for only 2,5 kJ.

Ü 9.14
a) $\varepsilon_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = 8{,}8$
b) Q = 500 kJ; W = 57 kJ; P = 47 W
c) Individuelle Antwort

Ü 9.15
a) Ausgaben pro Tag 23 €
b) 125kWh = 450 MJ; Heizöl hat einen Heizwert von 32,7MJ/Liter; Verbrauch 13,8 Liter pro Tag; Ausgaben: 14,40 €
c) Elektrische Energie: 28,6kWh; Ausgaben: 6,86 €

Ü 9.16 W = 5,4 MJ; Q = 16,2 MJ

Ü 9.17 Individuelle Antwort

Ü 9.18
a) … möglichst großflächige Wärmetauscher. / … abschalten bei zu kleiner Leistungszahl.
b) … verdampft das Kältemittel im Kondensor in den Kühlschlangen der Rückwand. / … hat der Kompressor die Aufgabe durch Drucksteigerung das Kältemittel aufzuheizen.

10 Wärmetransport

Ü 10.1
a) $Q = mc\Delta T = 44 \cdot 10^6\ J = 12{,}2\ kWh$
b) Kosten 94,51 Cent
c) $\Phi = uA\Delta T = 45\ W \Rightarrow$
$Q = \Phi \cdot t = 3{,}9 \cdot 10^{-6}\ J = 1{,}08\ kWh$
Der genaue Energieverlust liegt etwas niedriger, weil bei sinkender Temperatur des Wassers auch der Wärmestrom geringer wird.

Ü 10.2 Aus $Q = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$ folgt mit
$P = \frac{Q}{\Delta T}$ und $R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d}{A}$: $\Delta T = R_{th} \cdot P = 55\ K$;
geht man von Zimmertemperatur aus, so erreicht das Gehäuse beachtliche 75 °C. Es muss daher ständig diese Wärme durch einen Ventilator abgeführt werden.

Ü 10.3 4-mal so stark; d = 64 cm

Ü 10.4 Millionenstädte an Küsten sind z. B. London, Stockholm, St. Petersburg, New York, Los Angeles, San Francisco, Rio de Janeiro, Buenos Aires, Tokyo, Shanghai, Sidney, etc. mit ca. 200 – 250 Millionen Einwohnern; das sind mindestens 2,5 % der Weltbevölkerung
1) Nicht alle 50 km Küstennähe sind vom Meeresspiegelanstieg betroffen.
2) Beim Meeresspiegelanstieg verschiebt sich die Küstenlinie ins Landesinnere; die Bevölkerung wächst.

Ü 10.5 Wenn der Trend sich nicht ändert: in 735 Jahren (Bemerkung: Vor 735 Jahren ist die Herrschaft der Babenberger gerade zu Ende gegangen.)

Ü 10.6
a) Europa: N-Deutschland; Holland; Rest der Welt: Malediven, Bangla-Desh, Vietnam, Ägypten, …;
b) noch höhere Deiche, Ebbe und Flut können ausgeprägter werden (Sturmfluten)

Ü 10.7
a) h = 3330, 5 m; der Meeresspiegel steigt um 60 cm
b) h = 3330,12 m; der Meeresspiegel steigt um12 cm

Ü 10.8 Sommertemperaturen steigen, sind daher nicht mehr „erholsam"; flache Küstengebiete verschwinden; Gefahr von Tropenstürmen
Ö: Gletscher verschwinden; kein Permafrost: Felsen werden nicht mehr vom Eis zusammengehalten, Berge zerfallen, Gefahr von Bergstürzen und Murenabgängen

Ü 10.9 Das „Problem Erdöl" wird nur um Jahre/Jahrzehnte verschoben; vor allem dass Schwellenländer wie China, Indien, Brasilien, … jährlich mehr Öl verbrauchen. Höherer Einsatz an Technik (und Chemie) erfordert mehr Geld und auch mehr Eingriffe in die Ökologie; zudem ist Rohöl ein wichtiger Rohstoff für die Chemie und daher zu schade, um es nur zu verbrennen.
Die Angabe stimmen mit den 4 000 Millionen t Erdölförderung 2010 überein;
USA verbrauchen 1100 Millionen Tonnen

Ü 10.10 auf die beiden Weltkriege

Ü 10.11 bis v_{Wind} = 10 m/s steigert sich die Leistung auf 1 000 W, bei v_{Wind} = 25 m/s wird die Anlage abgeschaltet

Ü 10.12
a) Die Leistung einer Anlage hängt von der Rotorfläche und der Windgeschwindigkeit ab;
b) verdoppelt; achtfache

Ü 10.13 Der Umweltgemeinderat hat Recht. P hängt von ρ ab **(Ü10.11)**; in 900 m Seehöhe ist die Dichte der Luft geringer als auf Meeresniveau.

Ü 10.14 Extremwertaufgabe:
Setze $\frac{v_1}{v_2} = t$ und bilde $\frac{d\eta}{dt} \Rightarrow v_2 = 1/3\ v_1$

11 Fossile Rohstoffe

Ü 11.1
a) Steinkohle ist in den Erdzeitaltern Karbon und Perm entstanden (vor ca. 250 bis 360 Millionen Jahren), Braunkohle im Zeitalter des Tertiärs (2 bis 65 Millionen Jahre).
b) Die wichtigsten Ölvorkommen sind etwa 65 bis 200 Millionen Jahre alt.

Ü 11.2
a) Ja, jede der dargestellten Rohöl-Sorten besitzt mehr als 10 API-Grad und schwimmt daher auf Wasser.
b) ca. 3,2 bis 3,8% Schwefel; saures Rohöl.
c) 17 bedeutet die API-Grade
d) Brent Blend ist besser geeignet. Es besitzt einen höheren API-Grad und daher einen höheren Anteil an kurzkettigen Kohlenwasserstoffen. Außerdem besitzt es einen deutlich geringeren Schwefelgehalt.

Ü 11.3
a) Individuelle Antwort
b) Beim Fracking werden mit einem speziellen Bohrverfahren die gashaltigen Schichten horizontal angebohrt. Danach werden durch das Bohrloch kleine Löcher in das Gestein gesprengt. Wasser, das mit Chemikalien und Sand versetzt ist, wird mit hohem Druck eingepresst. Dadurch wird das Gestein weiter aufgesprengt und das Gas freigesetzt. Das Wasser wird wieder abgesaugt und das Gas strömt an die Oberfläche.

Ü 11.4 *A group of compounds collected together during distillation is called **fraction**.*

Ü 11.5 *One barrel is about 159 litres.*

Ü 11.6
a) Kohle ist vor 300 bis 400 Millionen Jahren aus tropischen Wäldern entstanden. Abgestorbene Pflanzenteile wurden unter Ausschluss von Luftsauerstoff umgewandelt. Unter dem Einfluss von höherer Temperatur in größeren Tiefen steigt der Kohlenstoffgehalt an. Der Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt nahmen immer weiter ab. Je älter die Kohle ist, umso höher ist ihr Kohlenstoffgehalt und damit ihr Heizwert.
b) Braunkohle Steinkohle, Anthrazit
c) Unter „Kohleverflüssigung" versteht man verschiedene Verfahren, die aus Kohle Kohlenwasserstoffe gewinnen. So kann z. B. Kohle mit Wasserstoff unter Druck mit Katalysatoren zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt werden.

Ü 11.7
TAL: Transalpine Line von Triest nach Ingolstadt
AWP: Adria-Wien-Pipeline von Triest nach Wien
TAG: Trans Austria Gasleitung von Baumgarten an der slowakisch-österreichischen Grenze bis Arnoldstein an der österreichisch-italienischen Grenze.

Ü 11.8

$H_3C—CH_3$ Ethan; Propan; $H_2C=CH_2$ Ethen; Propen; 1,3-Butadien; Benzen; Methylbenzen; 1,2-Dimethylbenzen

12 Derivate

Ü 12.1 Typisch für Halogenkohlenwasserstoffe sind eines oder mehrere Halogenatome (Fluor, Chlor, Brom, Iod).

Ü 12.2

Chlorethen; Tetrachlorethen

Ü 12.3
a) $HC{\equiv}CH + HCl \rightarrow$ Chlorethen

Ethin; Chlorethen

b) Additionsreaktion

Ü 12.4

$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl$ Chlormethane

$CH_4 + 2\,Cl_2 \rightarrow CH_2Cl_2$ Dichlormethane

$CH_4 + 3\,Cl_2 \rightarrow CHCl_3$ Trichlormethane

$CH_4 + 4\,Cl_2 \rightarrow CHCl_4$ Tetrachlormethane

Ü 12.5

NaOH

Alkohol *Natronlauge* *Alkohol* *Phenol* *HalogenKW* *Phenol*

Ü 12.6
a) Butan-2-ol; Cyclohexanol
b)

Ü 12.7 einwertig: Butan-1-ol, Ethanol;
mehrwertig: Ethan-1,2-diol, Glycerin

Ü 12.8
a) von links nach rechts: primär, sekundär, primär, tertiär
b) tertiär, sekundär, primär, primär

Ü 12.9 Aufgrund der großen Anzahl der OH-Gruppen wird das Molekül insgesamt hydrophil und damit löslich in Wasser sein.

Ü 12.10 $2\,Cu + O_2 \rightarrow 2\,CuO$

Ü 12.11

Ethanal; Butanal; Butan-2-on

Ü 12.12 Keton, Alkohol, Keton, Aldehyd

Ü 12.13 Silber-Ionen (Ag^+)werden dabei zu elementarem Silber reduziert. Daher wurde das Aldehyd oxidiert.

Ü 12.14

Propansäure

Ü 12.15

Alkohol: primär —Oxidation→ Aldehyd —Oxidation→ Carbonsäure; sekundär —Oxidation→ Keton; tertiär

Ü 12.16 **obere Reihe:** Aldehyd; Keton; Carbonsäure; Alkohol
untere Reihe: Alkohol; Keton; Aldehyd; Carbonsäure

Ü 12.17 $H_3C-CH_2-CH_2-COOH$ C_3H_7COOH

Ü 12.18 $C_nH_{2n+1}COOH$

Ü 12.19
$H-COOH$ *methanoic acid (formic acid)*
$H_3C-COOH$ *ethanoic acid (acetic acid)*
H_3C-CH_2-COOH *propanoic acid (propionic acid)*
$H_3C-CH_2-CH_2-COOH$ *butanoic acid (butyric acid)*
$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-COOH$ *pentanoic acid*

Ü 12.20 $H_3C-COO^-\,Na^+$ CH_3COONa Natriumacetat

Ü 12.21
a) gem. Deutscher Gesellschaft für Ernährung 100mg/Tag
b) Sanddorn, Johannisbeere, Kohl, Brokkoli, Paprika
c) Mangelerkrankung ist Skorbut (Gewebeschäden bis zur Beeinträchtigung der Körperfunktionen)

Ü 12.22
$HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COO^-$ hydrogentartrat
$^-OOC-CH(OH)-CH(OH)-COO^-$ tartrat

Ü 12.23 4-Hydroxybutansäure ($HO-CO-CH_2-CH_2-CH_2-OH$)

Butan-1,4-diol. ($HO-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-OH$)

Ü 12.24 ***c)*** *acetic acid*

Ü 12.25 $HCOOH + H_3C-CH_2-OH \rightleftharpoons HCOO-CH_2-CH_3 + H_2O$

Ü 12.26 (Salicylsäure: Benzolring mit COOH und OH)

Ü 12.27 Bei einem **Monoglycerid** ist nur eine OH-Gruppe von Glycerin mit einer Fettsäure verestert.
Bei einem **Diglycerid** sind zwei OH-Gruppen von Glycerin mit Fettsäuren verestert.

Ü 12.28
$HO-CH_2-CH(OH)-CH_2-O-CO-(CH_2)_{14}-CH_3$

Ü 12.29 *Fats are esters of glycerol and fatty acids. They are use to make soaps. Artificial esters are added e.g. to soaps and perfumes for their smell and e.g. to drinks, sweets and ice creams for their flavour. Esters are solvents for lacquers and adhesives.*

13 Reinigungsmittel

Ü 13.1 Individuelle Antworten

Ü 13.2 *soap is an anionic surfactant*

Ü 13.3 Skizze B.
Die hydrophilen Kopfgruppen befinden sich im Wasser

Ü 13.4 Zu den nichtionischen Tensiden

Ü 13.5
a) Natriumlaurylethersulfat
b) $(SO_3)^-$
c) Dodecanol
d) anionisches Tensid
e) anionisches Tensid

Ü 13.6 **Syn**thetisches **Det**ergens

Ü 13.7 Individuelle Antwort

Ü 13.8 Überreaktion des Immunsystems auf Inhaltsstoffe von Waschmitteln. Es kommen fast alle Inhaltsstoffe in Frage, besonders Enzyme, Tenside, Duftstoffe, Weichspüler.

14 Arzneimittel

Ü 14.1 Nein; Antibiotika wirken nicht gegen Viren

Ü 14.2 Resistenz ist die Widerstandsfähigkeit, Unempfindlichkeit von Bakterien gegenüber Antibiotika. Bei einer Antibiotika-Therapie sterben zuerst jene Bakterien ab, die am empfindlichsten sind. Die weniger empfindlichen überleben länger. Wird die Therapie zu früh abgebrochen, bleiben einige Bakterien am Leben und vermehren sich weiter. Die neuen Bakteriengenerationen sind dann resistenter gegen das Antibiotikum und werden mit der Zeit völlig unempfindlich.

Ü 14.3 Bei einer Infusion, weil der Wirkstoff direkt in das Blut kommt und nicht erst über den Verdauungstrakt.

Ü 14.4
a) Infusion **b)** Dragee **c)** Saft
d) Filmtablette **e)** Injektion **f)** Tropfen
g) Zäpfchen **h)** Kapsel

Ü 14.5 Magensaftresistente Arzneiformen müssen stabil sein gegen einen **sauren** pH-Wert.

Ü 14.6 *Film coated tablets, capsules*

15 Farbmittel

Ü 15.1 **a)** Rot, Grün und Blau
b) Ein Pullover erscheint in weißem Licht grün, weil er die Grundfarben **Rot und Blau absorbiert** und **Grün reflektiert**.

Ü 15.2 Lichtechtheit (kein Ausbleichen der Faser unter Lichteinfluss), Waschechtheit (Farbstoff darf sich beim Waschen nicht von der Faser lösen), stabil gegen Chlor (chem. Reinigung, Schwimmbäder), Hitzebeständigkeit, Bügelechtheit

Ü 15.3 **Einkomponentenlacke** enthalten im Wesentlichen folgende Bestandteile:
Pigmente – farbgebende Bestandteile (außer bei Klarlack)
Lösungsmittel – sorgen dafür, dass der Lack in einer dünnen Schicht aufgetragen werden kann.
Bindemittel – binden die Bestandteile zu einem zusammenhängenden Film.
Zusatzstoffe (Additive) – verbessern Qualität und Eigenschaften des Lacks.
Beim Einkomponenten-Lack trocknet das Lösungsmittel, und das Bindemittel bleibt als Film zurück.
Zweikomponentenlacke enthalten zusätzlich noch einen Härter. Beim Trocknen härtet das Bindemittel zu einer neuen Substanz aus. Dadurch kann man Lackfilme herstellen, die sonst nicht als Oberflächenschutz aufgetragen werden könnten (z. B. weil sie nicht im Lösemittel löslich sind).

Ü 15.4 Ein Indikator muss bei unterschiedlichen pH-Werten unterschiedliche Farben annehmen können. Unter dem Einfluss von H^+ bzw. OH^--Ionen ändern sich die chromophoren Gruppen im Molekül und damit die Farbe.
Die Substanz A ist ein Indikator (Cyanidin). Bei der Substanz B (Lycopin) ändert sich die Molekülstruktur im sauren und basischen Bereich nicht. Sie kann daher nicht als pH-Indikator verwendet werden.

Ü 15.5 **a)** ja (Methylorange)
b) nein (Anthrachinonfarbstoff – Alizarin)
c) nein (Triphenylmethanfarbstoff – Malachitgrün)
d) ja (Methylrot)

Ü 15.6 **a)** B (red) **b)** A, C **c)** D
d) blue and yellow **e)** red **f)** blue

Ü 15.7 grün (Spektrum von Chlorophyll)

Ü 15.8
☐ Die Substanz ist farblos.
☒ Die Substanz absorbiert sichtbare Licht.
☒ Die Substanz ist rot gefärbt.
☒ Die Substanz besitzt eine maximale Absorption bei 500nm.

Ü 15.9

Absorption: 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5
Konzentration(µg/ml): 0 10 16 20 24 30 36 40 50

16 Kunststoffe

Ü 16.1 Eine Schwefel-Kautschuk-Mischung ist zufällig auf eine heiße Herdplatte gefallen und es entstand eine dauerhaft elastische Masse

Ü 16.2 Durch Hitze wird aus der flüssigen Emulsion fester Kautschuk, der die Schnittstelle verschließt.

Ü 16.3 Eine höhere Anzahl von Schwefelbrücken. Hartgummi enthält 30-40 g Schwefel pro 100 g Kautschuk, Weichgummi nur bis zu 4% Schwefel.

Ü 16.4 Individuelle Antworten

Ü 16.5 Leichte Bearbeitbarkeit, geringes Gewicht und Beständigkeit.

Ü 16.6 **e)** Erdöl

Ü 16.7 Individuelle Antwort

Ü 16.8

Ü 16.9 HCl

Ü 16.10 Individuelle Antwort

Ü 16.11 Individuelle Antwort

Ü 16.12 Nylon, Polyester

Ü 16.13 Cellulose

Ü 16.14 Leichte Bearbeitbarkeit, geringes Gewicht und Beständigkeit.

Ü 16.15 350 Millionen/Jahr; Nein

Ü 16.16 Recycling (Einschmelzen), Spalten in Monomere, Verbrennen, Verwendung von abbaubarem Kunststoff, Verwendung von Biopolymeren.

Ü 16.17 Downcycling bedeutet, dass beim Recycling von Kunststoffen die Qualität abnimmt.

Ü 16.18 z. B. Stärke, Cellulose

17 Biomoleküle

Ü 17.1 **a)** Die Pflanze produziert aus Glucose Stärke. Dieser Vorgang ist ein **anabolischer** Prozess.
b) Beim Abbau von Glycogen in menschlichen Muskelzellen entsteht Glucose. Dieser Vorgang ist ein **katabolischer** Prozess.

Ü 17.2 Bei katabolischen Prozessen wird Energie gewonnen, bei anabolischen Prozessen wird Energie verbraucht.

Ü 17.3 **A)** Schinken **B)** Fisch **C)** Eier
D) Kartoffel (gekocht) **E)** Kartoffel (gebraten)
F) Weißbrot

Ü 17.4

Probe	Ergebnis der Tests			
	Glucose	Stärke	Fett	Eiweiß
Apfel	+	+	–	–
Banane	+	+	–	–
Brot	+	+	–	–
Milch	+	–	+	+
Butter	–	–	+	–
Fruchtjoghurt	+	–	+	+

Ü 17.5 Individuelle Antwort

Ü 17.6
a) Saccharose → α-Glucose + Fructose;
b) Cellulose → β-Glucose
c) Lactose → α-Galactose + Glucose
d) Maltose → α-Glucose + Glucose

Ü 17.7
a) Disaccharid: $C_{12}H_{22}O_{11}$;
Trisaccharid: $C_{18}H_{32}O_{16}$
b) Polysaccharid: $(C_6H_{10}O_5)_n$

Ü 17.8 *Starch is a storage polymer consisting of α-glucose. Cellulose is a structural polysaccharide consisting of β-glucose monomers. Humans are able to digest starch but they cannot diegst cellulose. Cellulose serves as dietary fibre (Ballaststoff) in the human diet.*

Ü 17.9 Chitin findet sich als Bestandteil der Außenskelette vieler Tiere (z. B. Insekten, Spinnen, Krebse) sowie als Baustoff der Zellwände von Pilzen.

Ü 17.10
a) 65-100 mg/dl (gemäß Deutsche Diabetes-Gesellschaft DDG)
b) Insulin senkt den Blutzuckerspiegel, Glucagon und Adrenalin erhöhen den Blutzuckerspiegel

Ü 17.11 Eine C20:4-Fettsäure besitzt 20 Kohlenstoff-Atome und 4 Doppelbindungen (Arachidonsäure)

Ü 17.12
a) Omega-3 Fettsäuren besitzen eine Doppelbindung am 3. Kohlenstoff-Atom – gezählt vom Kettenende[1]. z. B.: Linolensäure. Sie ist daher eine C18:3 omega-3-Fettsäure.

ω
CH_3
2
3
OH
O

b), c)

ω-3-Fettsäuren	
Linolensäure C 18:3	Leinöl, Walnussöl, Sojaöl, Rapsöl, Margarine
Eicosapentaensäure C 20:5	Seefische (z. B. Makrele, Lachs, Thunfisch)
Docosahexaensäure C 22:6	Seefische
ω-6-Fettsäuren	
Linolsäure C 18:2	Distelöl, Maiskeimöl, Sonnenblumenöl, Margarine
Arachidonsäure C 20:5	Schweinefleisch, geringe Mengen in der Milch

d) mehrfach ungesättigte Fettsäuren sind für den menschlichen Organismus essentiell. Von allen sind besonders die Omega-3-Fettsäuren von Bedeutung. Sie senken das LDL-Cholesterin und können daher einem Herzinfarkt entgegenwirken.

Ü 17.13 Ein zu hoher Gehalt an LDL-Cholesterin gilt als gefährlich, weil es sich an den Gefäßwänden ablagern kann. Dadurch steigt das Risiko für Schlaganfall und Herzinfarkt.
Umgekehrt verhält es sich mit dem HDL-Cholesterin. Es schützt die Gefäße.
Der Gehalt an LDL-Cholesterin im Blut soll also möglichst gering, der Gehalt an HDL-Cholesterin hoch sein.

Ü 17.14 Sojaöl

Ü 17.15
a) *Saturated fats contain only saturated fatty acids. They contain only C-C single bonds in their chains. Unsaturated fats contain unsaturated fatty acids. They contain one or more C=C double bonds per chain.*
b) *Mono-unsaturated fatty acids contain one C=C double bond in their chain.*

Ü 17.16
a) Verseifung des Fetts unter Bildung von Glycerin und Seife (Natrium-Salze der Fettsäuren)
b) Seife, Glycerin

Ü 17.17
a) Farbstoffe, Konservierungsmittel, Antioxidantien, Verdickungsmittel, Säureregulatoren, Geschmacksverstärker, Trennmittel, Zuckeraustauschstoffe, Enzyme, diverse andere Substanzen
b) Antioxidantien verhindern die Reaktion mit Luftsauerstoff
c) E 471 Mono- und Diglyceride als Emulgatoren; E450i Natriumphosphate als Verdickungsmittel; E304i Fettsäureester der Ascorbinsäure als Antioxidationsmittel; E330 Citronensäure als Antioxidationsmittel.
d) individuelle Antworten

Ü 17.18 Die Aminogruppe $-NH_2$ und die Carboxylgruppe -COOH

Ü 17.19
a) Tripeptid besteht aus 3 Aminosäuren
b) Polypeptid besteht aus vielen Aminosäuren (höchstens ca. 100)
c) Protein ist die Bezeichnung für ein natürliches Makromolekül bestehend aus Aminosäuren (meist mehr als 100)

[1] Omega ist der letzte Buchstabe im griechischen Alphabet.

Ü 17.20 **a)**

b) Das Tetrapeptid besteht aus 4 Aminosäuren
c) Val-Ala-Cys-Gly

Ü 17.21 Die Peptidbindung ist eine Elektronenpaarbindung

Ü 17.22 Die Sekundärstruktur eines Proteins wird fixiert durch Wasserstoffbrückenbindungen.

Ü 17.23 **a)** 2 α- und 2 β-Ketten
b) aus insgesamt 574 Aminosäuren
c) Häm
d) 4
e) Fe^{2+}

Ü 17.24

18 Stoffwechsel

Ü 18.1 Die Reaktion ist deshalb so selektiv, weil nur ein bestimmtes Substrat zum Enzym passt (Schlüssel-Schloss-Prinzip).

Ü 18.2 Oberhalb 60 °C sind Enzyme inaktiv, sie werden denaturiert.

Ü 18.3 **a)** Beim Raumthermostat ist das „Endprodukt" die Wärme, die von einem Heizkörper abgegeben wird. Ob mehr Wärme benötigt wird, wird über eine Temperaturmessung festgestellt. Wird mehr Wärme gebraucht (z. B. wenn kalte Luft in den Raum kommt), wird der Thermostat den Heizkörper einschalten. Wenn der Raum warm genug ist und keine weitere Wärmezufuhr benötigt wird, wird der Heizkörper abgeschaltet.
b) z. B.: Regulierung der Körperwärme, Regulierung des Säure/Base-Haushalts, Regulierung des Blutzuckerspiegels, Anpassung an Angst, Stress

Ü 18.4 **a)** 1 **b)** 3 **c)** 2

Ü 18.5
- R Coenzym A enthält das Monosaccharid Ribose und drei Phosphat Gruppen
- R Coenzym A enthält die heterocyclische Verbindung Adenin

Ü 18.6

Ü 18.7 **a)** Lactat ist das Salz der Milchsäure (2-Hydroxypropansäure).
b) Bei Sauerstoffmangel (anaerob) erfolgt in den Zellen ein Abbau der Glucose zu Lactat. Bei Überanstrengung oder falschem Training treten im Blut hohe Lactat-Werte auf.
c) Durch Messung der Lactat-Konzentration kann man die Leistungsentwicklung des Sportlers verfolgen.

Ü 18.8 Wasserstoff und Sauerstoff ergeben beim Entzünden eine Knallgasreaktion. Die einzelnen Reaktionsschritte verhindern, dass die gesamte Energie auf einmal freigesetzt wird und dadurch nicht genützt werden kann.

Ü 18.9 **a)** in den Citratzyklus
b) Stearinsäure ist eine C18-Fettsäure, es entstehen also bei vollständiger Oxidation 9 Moleküle Acetyl-CoA.
c) Pro Molekül Acetyl-CoA entstehen 12 Moleküle ATP. Aus 9 Molekülen Acetyl-CoA daher 108 Moleküle ATP.

Ü 18.10 Im NADP ist eine Phosphatgruppe an das Zuckermolekül gebunden.

Ü 18.11 **a)**

b) 3,5 units

Ü 18.12 **a)** Nucleotide
b) A: Phosphate, B: desoxyribsose (DNA), ribose (RNA)
c) organic bases – DNA: adenine, cytosine, guanine, thymine; RNA: adenine, cytosine, guanine, uracil

Ü 18.13 **a)** Pyrimidin
b) Purin

Ü 18.14 Die Doppelstränge der DNA werden durch **Wasserstoffbrückenbindungen** zusammengehalten.

Ü 18.15 RNA-Polymerase

Ü 18.16 **a)** CCUGAAGUA
b) GGACTTCAT

Ü 18.17 **a)** aus einer m-RNA (Uracil ist in der DNA nicht vorhanden)
b) …GU|UAC|UCU|GCU|GCU|GAA|GGA|GCU|GUA|C…
Thymin: UAC; Alanin: GCU

19 Biotechnologie

Ü 19.1 Ohne Sterilisation könnten sich Fremdkeime vermehren, wodurch nicht das gewünschte Endprodukt produziert wird.

Ü 19.2 Backhefe („Germ") beim Backen von Brot. Infolge der Ausscheidung von Kohlenstoffdioxid bzw. Alkohol entstehen im Teig Gasblasen. Der Teig wird locker.

Ü 19.3
2,3 Ein Bakterienplasmid wird mit Hilfe des Enzyms Restrictionsendunuclease zerschnitten
2,3 Die menschlichen DNA wird mit Hilfe des Enzyms Restrictionsendunuclease zerschnitten
1 Das Bereich auf der menschlichen DNA, der das Hormon X codiert wird identifiziert
6 In der Bakterienzelle werden die Plasmide mit dem menschlichen Gen vervielfacht
4 Das zerschnittene Plasmid wird mit dem menschlichen Gen zusammengefügt
7 Die genetische veränderten Bakterien werden in einem Fermenter gezüchtet
5 Das veränderte Plasmid wird in die Bakterienzelle eingefügt

Ü 19.4 Genetic engeneering

Ü 19.5 ~

Ü 19.6
a) Essigsäuregärung:
$C_2H_5OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O$
b) bei der hohen Konzentration an Ethanol können Bakterien nicht überleben

Ü 19.7
a) Malz, Wasser, Hopfen, Bierhefe
b) Weintrauben, Weinhefe

Ü 19.8 Bei Sauerstoffmangel in den Muskelzellen (Übersäuerung des Muskels)

Ü 19.9 Die menschliche (tierische) Zelle besitzt keine Zellwand.

Ü 19.10
a) 1
b) 3
c) 2

Ü 19.11
b) protein
c) enzyme

Griechisches Alphabet (Druckbuchstaben)											
Α α	Alpha	a	Η η	Eta	e	Ν ν	Ny	n	Τ τ	Tau	t
Β β	Beta	b	Θ ϑ	Theta	th	Ξ ξ	Xi	x	Υ υ	Ypsilon	y
Γ γ	Gamma	g	Ι ι	Jota	i	Ο ο	Omikron	o	Φ ϕ	Phi	ph
Δ δ	Delta	d	Κ κ	Kappa	k	Π π	Pi	p	Χ χ	Chi	ch
Ε ε	Epsilon	e	Λ λ	Lambda	l	Ρ ρ	Rho	r	Ψ ψ	Psi	ps
Ζ ζ	Zeta	z	Μ μ	My	m	Σ σ	Sigma	s	Ω ω	Omega	o

Vorsätze und Potenzen			
E	Exa	1 000 000 000 000 000 000	10^{18}
P	Peta	1 000 000 000 000 000	10^{15}
T	Tera	1 000 000 000 000	10^{12}
G	Giga	1 000 000 000	10^{9}
M	Mega	1 000 000	10^{6}
k	kilo	1 000	10^{3}
h	Hekto	100	10^{2}
da	deka	10	10^{1}
d	deci	0,1	10^{-1}
c	centi	0,01	10^{-2}
m	milli	0,001	10^{-3}
µ	mikro	0,000 001	10^{-6}
n	nano	0,000 000 001	10^{-9}
p	piko	0,000 000 000 001	10^{-12}
f	femto	0,000 000 000 000 001	10^{-15}
a	atto	0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}

Abgeleitete Einheiten				
Ebener Winkel	α	Radiant	*rad*	1 rad = 1m/m
Frequenz	f	Hertz	*Hz*	1 Hz = 1 /s
Kraft	F	Newton	*N*	1 N = 1 kgm/s²
Druck	p	Pascal	*Pa*	1 Pa = 1 N/m²
Arbeit	W	Joule	*J*	1 J = 1 Nm
Leistung	P	Watt	*W*	1 W = 1 J/s
elektr. Ladung	Q	Coulomb	*C*	1 C = 1As
elektr. Spannung	U	Volt	*V*	1 V = 1 W/A
elektr. Kapazität	C	Farad	*F*	1 F = 1 As/V
elektr. Widerstand	R	Ohm	*Ω*	1 Ω = 1 V/A
Induktivität	L	Henry	*H*	1 H = 1 Vs/A
Lichtstrom	Φ	Lumen	*lm*	1 lm = 1cd.sr
Beleuchtungsstärke	E	Lux	*lx*	1 lx = 1 lm/m²
Aktivität	A	Becquerel	*Bq*	1 Bq = 1/s
Energiedosis	D	Gray	*Gy*	1 Gy = 1 J/kg
Raumwinkel	ω	Steradiant	*sr*	1 sr = 1m²/m²

Wichtige physikalische Konstanten und Werte	
Lichtgeschwindigkeit	$c_o = 299\,792\,458$ m/s
Elementarladung	$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
Planck´sches Wirkungsquantum	$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js
Solarkonstante	$S = 1368$ W/m²
Masse des Protons	$m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ kg
Masse des Neutrons	$m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ kg
Masse des Elektrons	$m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ kg
Schallgeschwindigkeit in Luft (20°C)	$c = 344$ m/s
Schallgeschwindigkeit in Wasser	$c = 1464$ m/s
Boltzmann-Konstante	$k = 1{,}38\,.\,10^{-23}$ J/K
Wien'sche Konstante	$b = 2{,}9\,.\,10^{-3}$ mK
elektrische Feldkonstante	$\varepsilon_0 = 8{,}85\,.\,10^{-1}\frac{c^2}{Nm^2}$
magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 4\pi\,.\,10^{-7}\frac{Vs}{Am}$
atomare Masseneinheit	$u = 1{,}661 \cdot 10^{-27}\,kg$
Rydbergfrequenz	$R_\infty = 3{,}289 \cdot 10^{15}\,Hz$
allgemeine Gaskonstante	$R = 8{,}315\,J/molK$

Mathematische Symbole
a ≈ b: a angenähert gleich b
a ~ b: a ist proportional b
a>>b: a sehr groß gegen b

Strahlungsgesetze	
Wien'sches Verschiebungsgesetz	$\lambda_{max} \cdot T = b$
Stefan-Boltzmann-Gesetz	$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$

Relativitätstheorie	
Lorentzfaktor	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c_o^2}}}$
Zeitdilatation	$\overline{\Delta t} = \Delta t \cdot \gamma$
Lorentzkontraktion	$\overline{\Delta x} = \Delta x \cdot \gamma$
Relativistischer Dopplereffekt	$f_B = f_Q \cdot \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c_o}}{1-\frac{v}{c_o}}}$
Relativistische Geschwindigkeitsaddition	$u = \frac{\overline{u}+v}{1+\frac{v \cdot \overline{u}}{c_o^2}}$
Lichtgeschwindigkeit	$c_o = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \cdot \mu_o}}$
Relativistische Massenzunahme	$m = \frac{m_o}{\gamma}$
Äquivalenz Energie - Masse	$E = m \cdot c_o^2$

Quantenmechanik	
Impuls eines Photons	$p = \frac{h}{\lambda}$
De Broglie-Wellenlänge	$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$
Energie einer Strahlung	$E = h \cdot f$
Unschärfe-Relationen	$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4 \cdot \pi}$ $\quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4 \cdot \pi}$

Atom- und Kernphysik	
Bohr´sche Atomradien	$r_n = n \cdot \frac{h^2 \varepsilon_o}{\pi e^2 m_e}$
Frequenzen des H-Spektrum	$f = R_\infty \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$
Massendefekt	$\Delta m = \Sigma m - m_o$
Zerfallsgesetz	$N(t) = N_o \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

Thermodynamik	
Wärmemenge	$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$
Heiz-, Brennwert	$Q = H \cdot V$
Allgemeine Gasgleichung	$\frac{p \cdot V}{T} = const$
Gesetz von Charles	$\frac{V}{T} = const$
Gesetz von Gay-Lussac	$\frac{p}{T} = const$
Gesetz von Boyle-Mariotte	$p \cdot V = const$
Zustandsgleichungen	$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T = n \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T$
Kinetische Definition des Drucks	$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m_0 \cdot \overline{v^2}$
1. Hauptsatz der Wärmelehre	$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$
Adiabatische Gleichungen	$p \cdot V^{\kappa} = const\, ;\, T \cdot p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = const\, ;\, T \cdot V^{\kappa-1} = const$
Carnot´scher Wirkungsgrad	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$
Wärmeleitung	$Q = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$

Mit Bescheid des Bundesministeriums für Unterricht, Kunst und Kultur mit GZ 5.034/0066-B/8/2013 vom 5. Februar 2014 gemäß den derzeit geltenden Lehrplänen als für den Unterrichtsgebrauch für den III.–IV. Jahrgang an Höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten im Unterrichtsgegenstand Naturwissenschaften geeignet erklärt.

Schulbuchnummer: 165015

Die Autoren und der Verlag bitten, alle Anregungen und Vorschläge, die dieses Lehrbuch betreffen, an folgende Adresse zu senden:
Verlag Hölder-Pichler-Tempsky GmbH
1090 Wien, Frankgasse 4
E-Mail: service@hpt.at

Textquellen:
S. 173 Kleine Zeitung, 31.01.2013; S. 180 der Standard, 10.08.2011; S. 183 Salzburger Nachrichten, 14.09.2012; S. 189 OÖN, 16.09.2011 sowie derStandard, 28.06.2012; S. 196 Salzburger Nachrichten, 08.02.2010; S 206 Salzburger Nachrichten, 07.01.2011; S. 220 ORF-News 11.07.2012 sowie Kleine Zeitung, 24.06.2012; S. 224 Salzburger Nachrichten, 17.09.2012; S. 227 Salzburger Nachrichten, 21.03.2013; S. 230 derStandard, 16.02.2013; S. 238 derStandard, 03.02.2013; S. 241 derStandard, 16.05.2012; S. 242 derStandard, 07.11.2011; S. 247 derStandard, 16.02.2012; S. 248 derStandard, 16.02.2012; S. 252 Salzburger Nachrichten, 07.01.2013; S. 254 derStandard, 07.07.2012

Bildquellen:
S. 5 Sebastian Kaulitzki – Fotolia; 6.1 Wikimedia commons; 6.3 Wikimedia commons; 7.1 Wikimedia commons; 11.2 Stokkete – Fotolia; S. 12 adimas – Fotolia; 16.3 Wikimedia commons; 18.2 Wikimedia commons; 19.3 Bildstelle Deutsches Museum München; 21.2 Time Magazin, Oktober 1971; 24.1 DESY, Hamburg; 29.1 Maximilian Brice/CERN; 29.2 CERN; 30.1 Wikimedia commons; 30.2 CERN; 31.2 James Thew – Fotolia; 32.1 Wikimedia commons; 32.2 Wikimedia commons; 33.1 Bildstelle Deutsches Museum München; 33.3 Bildstelle Deutsches Museum München; 35.3 Bildstelle Deutsches Museum München; 38.2 Bildstelle Deutsches Museum München; 39.1 ESA; 40.1 Bildstelle Deutsches Museum München; 41.1 NASA; S. 42 olly – Fotolia; 43.4 Bildstelle Deutsches Museum München; 47.2 Bildstelle Deutsches Museum München; 47.3 chrisdorney – Fotolia; 48.3 Bildstelle Deutsches Museum München; 50.2 Wikimedia commons; 50.3 Wikimedia commons; 51.3 Bibliothek, Technisches Museum, Wien; 52.1 Charles Addams, New Yorker 1040; 53.2 Wikimedia commons; 54.2 CERN; 57.3 Wikimedia commons; 57.4 IBM Forschungslabor; 59.3 Bildstelle Deutsches Museum München; S. 62 A_Bruno – Fotolia; 69.1 Wikimedia commons; 76.1 Bildstelle Deutsches Museum München; 78.2 Bildstelle Deutsches Museum München; 81.1 Wikimedia commons; 81.3 Wikimedia commons; 82.1 Apa; 82.2 Apa; 84.3 bptu – Fotolia; 85.1 coward_lion – Fotolia; 85.2 United States Department of Energy; 85.3 United States Department of Energy; 86.3 Gwurden, Wikimedia commons; S. 88 psdesign1 – Fotolia; 89.1 Pierre Omidyar, Wikimedia commons; S. 95 NJ – Fotolia; 97.1 Mediendesign – Fotolia; 97.2 NASA; 98.3 GeoForschungszentrum Potsdam; 101.3 NASA; 103.1 NASA; 103.2 NASA; S. 107 Karin & Uwe Annas – Fotolia; 108.2 Wikimedia commons; 110.2 Kirill Perepjolkin – Fotolia; 111.1 Deutsches Museum, München; 111.3 Deutsches Museum, München; 117.2 Square One Research PTY LTD., PO Box 1003 Joondalup, WA 6919 Australia; S. 124 Tim – Fotolia; 130.2 Wikimedia commons; S. 136 Charles Jacques – Fotolia; 137.1 Deutsches Museum, München; 138.1 Holzschnitt, Sammlung Germanisches Nationalmuseum (gemeinfrei), Wikimedia commons; 138.2 Deutsches Museum, München; 139.3 Wikimedia commons; 140.2 Wikimedia commons; 144.1 sv_photo – Fotolia; 145.3 Константин Кудинов, Wikimedia commons; 147.1 Air Products and Chemicals, Inc. 7201 Hamilton Boulevard, Allentown PA 181945–1501; 147.2 Wikimedia commons; 150.2 JENS – Fotolia; 150.3 Wikimedia commons; 152.2 Verbund Wien; S. 156 Rainer Albiez – Fotolia; 161.2 Salzburger Nachrichten, 5.6.2014; 166.3 chiakto – Fotolia; 167.1 Wikimedia commons; 167.5 Jörg Lantelm – Fotolia; 168.1 Wolfgang Jargstorff – Fotolia; 169.2 mahoe – Fotolia; 170.1 Gorilla – Fotolia; S. 172 ping han – Fotolia; 173.2 ALCE – Fotolia; 173.3 Wikimedia commons; 173.4 Wikimedia commons; 174.1 bp Erdöl bewegt die Welt, S. 36; 174.3 VanderWolf Images – Fotolia; 174.4 VanderWolf Images – Fotolia; 175.3 bp Erdöl bewegt die Welt, S. 40; 176.1 al62 – Fotolia; 176.2 Richard Villalon – Fotolia; 177.1 eyetronic – Fotolia; S. 179 2012ayur41 – Fotolia; 180.2 Danny S., Wikimedia commons; 186.1 Wikimedia commons; 189.2 Claus Ableiter, Wikimedia commons; 190.5 Andrey Kuzmin – Fotolia; S. 192 Schlierner – Fotolia; 194.2 Birgit Reitz–Hofmann – Fotolia; 194.3 photo 5000 – Fotolia; 195.1 Stefan Körber – Fotolia; 195.4 Ichbins11 – Fotolia; 195.5 Andrey Kiselev – Fotolia; 197.3 Wikimedia commons; S. 198 Alexander Raths – Fotolia; 199.2 fotomek – Fotolia; 199.3 Public Domain, Wikimedia commons; 201.1 Robert Kneschke – Fotolia; 201.2 Robert Kneschke – Fotolia; 202a) Africa Studio – Fotolia; 202b) Wolfgang Mucke – Fotolia; 202c) monropic – Fotolia; 202d) cst21 – Fotolia; 202e) Santiago Cornejo – Fotolia; 202f) seen – Fotolia; 202g) cuhle–fotos – Fotolia; 202h) Nomad_Soul – Fotolia; S. 203 rockpix – Fotolia; 204.1 Eldad Carin – Fotolia; 204.2 Dan Brady, Wikimedia commons; 204.5 Prospekt; 205.1 VALERIA TARLEVA – Fotolia; 205.2 atoss – Fotolia; 205.3 Anton Gorbachev – Fotolia; 205.4 Wassermelone – Sailorr – Fotlia; 205.5 Tom – Fotolia; 205.6 Zyance, Wikimedia commons; 206.2 Hans Hillewaert, Wikimedia commons; 206.3 Vassil (cropped by PKM), Wikimedia commons; 207.3 donatas1205 – Fotolia; S. 212 richterfoto – Fotolia; 213.1 Nobel Foundation, Wikimedia commons; 213.2 Benjamin Bahr – Fotolia; 213.6 Public Domain, Wikimedia commons; 215.2 Wikimedia commons; 217.1 olesiabilkei – Fotolia; 218.1 fotofuerst – Fotolia; S. 219 Grecaud Paul – Fotolia; 220.2 michaeljung@163.com – Fotolia; 224.1 Microstock Man – Fotolia; 225.7 Klaus Höpfner, Wikimedia commons; 231.1 Klaus Eppele – Fotolia; S. 233 Lonely – Fotolia; 240.4 .shock – Fotolia; 242.2 Kristian Peters, Wikimedia commons; 242.3 Wikimedia commons; 243.3 Biochemistry, Cambridge University Press, Seite 74; 245.5 Karlson, Kurzes Lehrbuch der Biochemie, Georg Thieme Verlag, 1972, Seite 293; 246.3 PaleWhaleGail, Wikimedia commons; 246.4 MarkS, Wikimedia commons; S. 249 Andrey Popov – Fotolia; 250.4 Eva Decker, Wikimedia commons; 250.5 JNI Corporation, Wikimedia commons; 253.2 Wikimedia commons; 254.1 Comugnero Silvana – Fotolia

Alle nicht näher bezeichneten Abbildungen stammen von Verlag und Autoren.

1. Auflage, 2014 (1,00)

Satz: Manuela Strasser, www.kameleon.at, Wien
Technische Zeichnungen: Dr. Herbert Löffler
Illustrationen: Andreas Slama, Hausbrunn
Druck und Bindung: Brüder Glöckler GmbH, Wöllersdorf
ISBN 978-3-230-03541-7

Der neue Naturwissenschafts-Lehrgang für HTL
Von Technikern für Techniker!
Entspricht den aktuellen kompetenzorientierten Lehrplänen!

Durchgerechnete Beispiele, attraktive Übungen und ein ansprechendes Layout helfen, das Erlernte anzuwenden und zu festigen.

- Anwendungsorientiert: Vorgerechnete Musterbeispiele und zahlreiche Übungen ermöglichen einen gezielten Erwerb und eine Überprüfung der Grundkompetenzen.
- Ansprechend: Zielgruppengerechte grafische Gestaltung und eine verständliche Sprache erleichtern das Lesen und Lernen.
- Aktuell: Kulturelle, wirtschaftliche und gesellschaftliche Themen geben Anregungen zum verantwortlichen Handeln.

www.hpt.at

Naturwissenschaften HTL: 4 Jg.
Schulbuchnummer: 165015
ISBN 978-3-230-03541-7
Wien, 1. Auflage

Alle Drucke der 1. Auflage können im Unterricht nebeneinander verwendet werden.

9 783230 035417